

A Nossa
Universidade

Colégio dos Jesuítas
Rua dos Ferreiros - 9000-082, Funchal

Tel: +351 291 209400
Fax: +351 291 209410
Email: gabinetedareitoria@uma.pt

DM

Estudo de Soluções de Monitorização Automática
de Ribeiras para Prevenção do Risco de Aluviões
Sara Regina Fernandes Araújo



Estudo de Soluções de Monitorização Automática de Ribeiras para Prevenção do Risco de Aluviões

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Sara Regina Fernandes Araújo

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL


UNIVERSIDADE da MADEIRA
A Nossa Universidade
www.uma.pt

setembro | 2014

DIMENSÕES: 45 X 29,7 cm

PAPEL: COUCHÊ MATE 350 GRAMAS

IMPRESSÃO: 4 CORES (CMYK)

ACABAMENTO: LAMINAÇÃO MATE

NOTA*

Caso a lombada tenha um tamanho inferior a 2 cm de largura, o logótipo institucional da UMa terá de rodar 90°, para que não perca a sua legibilidade|identidade.

Caso a lombada tenha menos de 1,5 cm até 0,7 cm de largura o laoyut da mesma passa a ser aquele que consta no lado direito da folha.



Estudo de Soluções de Monitorização Automática de Ribeiras para Prevenção do Risco de Aluviões

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Sara Regina Fernandes Araújo

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

ORIENTADOR

Paulo Miguel de Macedo França

CO-ORIENTADOR

José Carlos Fernandes Neves



UNIVERSIDADE da MADEIRA

CENTRO DE COMPETÊNCIAS DAS CIÊNCIAS EXATAS E DA ENGENHARIA

Estudo de Soluções de Monitorização Automática de Ribeiras para Prevenção do Risco de Aluviões

Dissertação submetida para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil

por

SARA REGINA FERNANDES ARAÚJO

Orientador

Paulo Miguel Macedo França

(Universidade da Madeira)

Co-orientador

José Carlos Fernandes Neves

(Laboratório Regional de Engenharia Civil)

UMa, setembro de 2014



UNIVERSIDADE da MADEIRA

CENTRO DE COMPETÊNCIAS DAS CIÊNCIAS EXATAS E DA ENGENHARIA

Estudo de Soluções de Monitorização Automática de Ribeiras para Prevenção do Risco de Aluviões

Dissertação submetida para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil

por

SARA REGINA FERNANDES ARAÚJO

Júri

Presidente: Professor José Manuel Martins Neto dos Santos

Arguente: Professor Sérgio António Neves Lousada

Orientador: Professor Paulo Miguel Macedo França

UMa, setembro de 2014

AGRADECIMENTOS

Ao orientador, o Doutor Paulo França, por me ter aceite como sua orientanda e pela disponibilidade e interesse demonstrados ao longo da elaboração da dissertação.

Ao co-orientador, o Engenheiro Carlos Neves, por toda a ajuda prestada, indispensável à concretização deste trabalho.

Aos funcionários do Laboratório Regional de Engenharia Civil, pela simpatia e prestabilidade demonstradas, em especial aos Engenheiros Lisandra Camacho e João Silva.

À Doutora Susana Prada, pelo empréstimo de material bibliográfico, nomeadamente a Carta de Solos da Ilha da Madeira.

Aos meus pais e restantes familiares pelo apoio e por nunca terem duvidado das minhas competências, em especial à minha irmã Marta.

Aos meus amigos e colegas, pela companhia e apoio nos momentos bons e nos mais difíceis.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a elaboração da tese.

RESUMO

As aluviões, também denominadas por fluxos de detritos ou enxurradas, são movimentos de vertente rápidos, que ocorrem por ação da água e são consideradas um dos fenómenos mais perigosos em regiões montanhosas, causando prejuízos por onde passam. Como forma de prevenção, mas também como forma de estudo das condições inerentes à formação destes fenómenos e do respetivo comportamento ao longo do seu percurso, deve ser atribuído um papel importante à monitorização automática dos cursos de água.

Na Ilha da Madeira, a aluvião mais recente aconteceu a 20 de fevereiro de 2010, afetando os concelhos da vertente Sul, particularmente os do Funchal e Ribeira Brava. Este evento surgiu devido a uma situação meteorológica adversa, com precipitações de elevada intensidade, resultando no transporte de um elevado volume de material sólido que levou ao transbordamento das ribeiras, obstruindo completamente a baixa funchalense e outros locais.

Portanto, esta dissertação surge como introdução à temática do estudo e monitorização dos fluxos de detritos na Ilha da Madeira, onde, inicialmente, foi realizada uma primeira abordagem ao fenómeno, referindo as suas causas e características, tendo sido, também, mencionadas algumas das aluviões que assolaram a ilha.

Posteriormente, foram descritos alguns dos equipamentos incluídos num sistema de monitorização, com as respetivas vantagens e desvantagens, bem como a descrição de alguns sistemas existentes.

Como objetivo deste trabalho, foi idealizada uma solução de monitorização automática para a bacia hidrográfica da Ribeira de Machico, tendo sido analisadas as propriedades morfológicas da bacia, seguindo-se uma descrição dos sensores utilizados e a sua localização.

Por fim, como caso de estudo, foi apresentado o sistema de monitorização a ser implementado pelo LREC (Laboratório Regional de Engenharia Civil), onde foram definidos os aparelhos utilizados, bem como a respetiva localização.

Palavras-chave: Aluviões, Ribeiras, Sistemas de monitorização, Monitorização automática, Bacia hidrográfica.

ABSTRACT

Debris flow are a fast mass movement, by water action, and they are considered one of the most dangerous phenomena on mountain regions, causing damage along its course. As a way of prevention, but also as a way of studying the conditions related to the origin of these phenomena and its behavior along the stream, automatic monitoring must play an important role.

In Madeira Island, the most recent debris flow occurred at 20 February 2010, affecting the southern part of the island, particularly, the counties of Funchal and Ribeira Brava. This event occurred due to an adverse meteorological situation, with high intensity rainfall. The result was the transportation of a high volume of debris which led to the overflow of watercourses, completely obstructing Funchal's and other places main arteries.

Thus, this dissertation acts as an introduction to the study and monitoring of debris flows in Madeira Island. Initially, a first approach to the phenomenon was realized and its characteristics and causes were expressed. Some of the debris flows that devastated the island were also mentioned.

Subsequently, some of the equipment featured in a monitoring system were described, along its advantages and disadvantages, as well as the description of some worldwide existing monitoring systems.

As a goal of this report, a solution of an automatic monitoring system to the watershed of Machico's stream was idealized. The morphological properties of the catchment were analyzed, followed by a description of the sensors used and its location.

At last, as a study case, the monitoring system being implemented by LREC was described, where the equipment used and its location were defined.

Key words: Debris flow, Streams, Monitoring systems, Automatic monitoring, Watershed.

ÍNDICE DE TEXTO

AGRADECIMENTOS	v
RESUMO	vii
ABSTRACT	ix
ÍNDICE DE TEXTO	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xv
ÍNDICE DE TABELAS.....	xvii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xix
CAPÍTULO 1 . INTRODUÇÃO.....	1
1.1. ENQUADRAMENTO GERAL.....	1
1.1.1. INTRODUÇÃO AO FENÓMENO DAS ALUVIÕES E SUA MONITORIZAÇÃO	1
1.1.2. BREVE REVISÃO HISTÓRICA DE ALUVIÕES NA ILHA DA MADEIRA	4
1.2. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO	6
1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	6
CAPÍTULO 2 . ANÁLISE DO ESTADO DE ARTE.....	9
2.1. SISTEMAS DE MONITORIZAÇÃO DE ALUVIÕES.....	9
2.1.1. EQUIPAMENTOS CONSTITUINTES DE UM SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO DE ALUVIÕES	9
2.1.1.1. GEOFONES	10
2.1.1.2. SENSORES ULTRASSÓNICOS.....	18
2.1.1.3. SENSOR COM TECNOLOGIA DE RADAR.....	21
2.1.1.4. EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO E REGISTO DA PRECIPITAÇÃO.....	23
2.1.1.4.1. UDÓMETROS	25
2.1.1.4.2. UDÓGRAFOS.....	27
2.1.1.4.3. ERROS ASSOCIADOS AOS APARELHOS	30
2.1.1.4.4. SENSOR DE PRECIPITAÇÃO A LASER.....	32
2.1.1.5. CÂMARA DE VÍDEO	34
2.1.1.6. SENSOR DE MEDIÇÃO DO TEOR EM ÁGUA DO SOLO	35
2.1.1.7. SENSORES DE FIO	37
2.2. SISTEMAS DE MONITORIZAÇÃO EXISTENTES.....	38
2.2.1. TORRENTE DE MOSCARDO, ITÁLIA	39
2.2.2. TAIWAN	43
2.2.3. ACQUABONA, ITÁLIA	46

2.2.4. CALIFÓRNIA, EUA	53
------------------------------	----

CAPÍTULO 3 . PROPOSTA DE APLICAÇÃO DE UM SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO A UMA BACIA HIDROGRÁFICA DA RAM

3.1. CARACTERIZAÇÃO BIOFÍSICA DA BACIA	57
--	----

3.1.1. ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO	57
---------------------------------------	----

3.1.2. GEOMORFOLOGIA	58
----------------------------	----

3.1.3. PRECIPITAÇÃO	58
---------------------------	----

3.1.4. GEOLOGIA	59
-----------------------	----

3.1.5. SOLOS	59
--------------------	----

3.1.6. COBERTURA VEGETAL	59
--------------------------------	----

3.1.7. OCUPAÇÃO DO SOLO	60
-------------------------------	----

3.2. ANÁLISE MORFOLÓGICA DA BACIA	61
---	----

3.2.1. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DA BACIA	62
---	----

3.2.1.1. ÁREA DE DRENAGEM	62
---------------------------------	----

3.2.1.2. FORMA DA BACIA	62
-------------------------------	----

3.2.1.3. FATOR DE FORMA, K_f	63
--------------------------------------	----

3.2.2. CARACTERÍSTICAS DA REDE DE DRENAGEM	64
--	----

3.2.2.1. CONSTÂNCIA DO ESCOAMENTO	65
---	----

3.2.2.2. HIERARQUIZAÇÃO DA REDE DE DRENAGEM	65
---	----

3.2.2.3. RELAÇÃO DE BIFURCAÇÃO, R_b	66
---	----

3.2.2.4. DENSIDADE DE DRENAGEM, D_d	67
---	----

3.2.2.5. PERCURSO MÉDIO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL SOBRE O TERRENO DESDE O LIMITE DA BACIA ATÉ UM CURSO DE ÁGUA, PL	68
--	----

3.2.2.6. PERCURSO MÉDIO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL SOBRE O TERRENO ATÉ UM CURSO DE ÁGUA, P	69
---	----

3.2.2.7. DENSIDADE HÍDRICA, D_h	69
---	----

3.2.2.8. TEMPO DE CONCENTRAÇÃO	69
--------------------------------------	----

3.2.2.9. TEMPO DE RESPOSTA	71
----------------------------------	----

3.2.3. CARACTERÍSTICAS DO RELEVO	71
--	----

3.2.3.1. CURVA HIPSOMÉTRICA	71
-----------------------------------	----

3.2.3.2. CURVA HIPSOMÉTRICA ADIMENSIONAL	72
--	----

3.2.3.3. ALTITUDE E ALTURA MÉDIA	73
--	----

3.2.3.4. PERFIL LONGITUDINAL DO CURSO DE ÁGUA PRINCIPAL	73
---	----

3.2.3.5.	DECLIVE MÉDIO DO CURSO DE ÁGUA PRINCIPAL	74
3.2.3.6.	DECLIVE 10;85.....	74
3.2.3.7.	DECLIVE MÉDIO DA BACIA.....	75
3.2.3.8.	ÍNDICE DE RELEVO, IR	75
3.3.	SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DA RIBEIRA DE MACHICO.....	77
3.3.1.	NECESSIDADE DE MONITORIZAÇÃO DA BACIA.....	77
3.3.2.	MONITORIZAÇÃO DA ZONA DE MONTANTE DA BACIA.....	78
3.3.3.	MONITORIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA ALUVIÃO AO LONGO DO CURSO DE ÁGUA PRINCIPAL	81
CAPÍTULO 4 .	ANÁLISE DO SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO DO LREC.....	87
4.1.	CARACTERÍSTICAS DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS EM ESTUDO	87
4.2.	SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS	89
CAPÍTULO 5 .	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	93
5.1.	PRINCIPAIS CONCLUSÕES	93
5.2.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	95
REFERÊNCIAS	97
ANEXOS	103
ANEXO I –	DADOS PARA A CONSTRUÇÃO DA CURVA HIPSOMÉTRICA.....	103
ANEXO II –	DADOS PARA A REALIZAÇÃO DO PERFIL LONGITUDINAL DO CURSO DE ÁGUA PRINCIPAL ..	104
ANEXO III –	PROPOSTA DE LOCALIZAÇÃO DAS SECÇÕES DE MONITORIZAÇÃO	105

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Vista da Ribeira de João Gomes na aluvião de 20 de fevereiro de 2010 [52].	2
Figura 1.2 - Esquema de uma vaga de um fluxo de detritos, adaptado de [39].	2
Figura 1.3 - Ribeira de Santa Cruz, junto ao edifício do tribunal [45].	5
Figura 1.4 - Frequência de aluviões entre 1803 e 2011, adaptado de [46].	6
Figura 2.1 - Sensores de vibração do solo: A: Sismómetro [21] e B: Geofone.	11
Figura 2.2 - Velocidade média de vibração do solo em função do tempo, adaptado de [3].	12
Figura 2.3 - Montagem dos sensores: A: fixados numa caixa metálica; B: fixados diretamente ao solo e C: pregado ao solo [1].	13
Figura 2.4 - Sinal de saída analógico de 4 geofones na Torrente de Moscardo para uma aluvião [8].	15
Figura 2.5 - Sinal processado pelo método dos impulsos para uma aluvião (a), para uma cheia (b) e para uma quebrada (c) [8].	15
Figura 2.6 - Comparação entre os registos gráficos correspondentes aos níveis de escoamento pelos sensores ultrassónicos (a azul) e à amplitude do sinal sísmico (a verde), na Torrente de Moscardo [8].	16
Figura 2.7 - Gráfico de uma aluvião na Torrente de Moscardo, adaptado de [7].	19
Figura 2.8 - Sensor ultrassónico colocado num canal de superfície livre [25].	19
Figura 2.9 - Esquema de medição da velocidade por parte dos sensores ultrassónicos, adaptado de [6].	20
Figura 2.10 - Sensor radar colocado num canal da bacia de Illgraben, Suíça [12].	22
Figura 2.11 - Instruções de localização de um equipamento de medição da precipitação [50].	25
Figura 2.12 - Esquema de um udómetro [50].	26
Figura 2.13 - Ninho de pássaro num udómetro da estação meteorológica flutuante do Alqueva [58].	27
Figura 2.14 - Udógrafo de báscula (A) e respetivo mecanismo (B), adaptado de [16].	28
Figura 2.15 - Influência do vento na captação da precipitação, dependendo do tipo de equipamento: a) maior influência b) influência intermédia e c) menor influência, adaptado de [67].	31
Figura 2.16 - Erro sistemático e aleatório, adaptado de [44].	31
Figura 2.17 - Sensor de precipitação a laser da Thies. O sensor da esquerda é uma versão mais antiga e o frontal é a versão mais recente [15].	32
Figura 2.18 - Sensor de humidade do solo. Modelo Decagon 10HS [19].	36
Figura 2.19 - Sensores de fio [11].	38
Figura 2.20 - Torrente de Moscardo. 1: zona de iniciação das aluviões; 2: udómetros; 3 e 4: trechos instrumentados [38].	40
Figura 2.21 - Localização das seções instrumentadas [38].	41
Figura 2.22 - Distribuição das 22 estações de monitorização “on site” em Taiwan.	44

Figura 2.23 - Estação de monitorização móvel de aluviões [68].	45
Figura 2.24 - Localização da bacia de Acquabona [14].	46
Figura 2.25 - Sistema de monitorização de Acquabona, em 1997 [11].	49
Figura 2.26 - Estação de monitorização de jusante, 2009 [37].	52
Figura 2.27 - Diagrama tipo de uma estação de monitorização, adaptado de [30].	55
Figura 3.1 - Concelhos da Ilha da Madeira e bacia hidrográfica da Ribeira de Machico.	57
Figura 3.2 - Precipitação média anual.	58
Figura 3.3 - Fotografias aéreas da bacia de Machico em 1963 (à direita) e em 1991 (à esquerda) [51].	60
Figura 3.4 - Comparação do uso do solo em 1963 e 1991 [51].	61
Figura 3.5 - Classificação de Strahler para a bacia da Ribeira de Machico.	66
Figura 3.6 - Curva hipsométrica.	71
Figura 3.7 - Curva hipsométrica obtida por ArcGIS.	72
Figura 3.8 - Curvas hipsométricas adimensionais [40].	72
Figura 3.9 - Curva hipsométrica adimensional da bacia da Ribeira de Machico.	73
Figura 3.10 - Perfil longitudinal do curso de água principal.	74
Figura 3.11 - Representação do Perfil longitudinal e dos Declives médio e 10;85.	75
Figura 3.12 - Localização dos udógrafos.	79
Figura 4.1 - Localização das bacias hidrográficas monitorizadas pelo LREC.	88
Figura 4.2 - Sistema de monitorização do LREC para a bacia hidrográfica da Ribeira Brava.	90
Figura 4.3 - Sistema de monitorização do LREC para as bacias hidrográficas das ribeiras do Funchal.	91
Figura 4.4 - Diagrama de ligações entre as câmaras de vídeo, <i>gateways</i> e LREC.	92
Figura A.1 - Proposta de localização das secções de monitorização.	105

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Parâmetros utilizados na caracterização das aluviões e respectivos sensores, adaptado de [6].	10
Tabela 2.2 - Precipitações máximas de alguns postos a 20 de fevereiro de 2010 [54].	24
Tabela 2.3 - Comparação entre os valores de velocidade obtidos pelos sensores ultrassônicos e pelas câmaras de vídeo, adaptado de [5].	34
Tabela 2.4 - Características morfométricas da bacia de Acquabona, adaptado de [14].	47
Tabela 2.5 - Características das bacias monitorizadas.	53
Tabela 2.6 - Parâmetros e sensores utilizados em cada estação de monitorização, adaptado de [30].	54
Tabela 3.1 - Resumo das características geométricas da bacia hidrográfica.	64
Tabela 3.2 - Hierarquização da rede segundo a classificação de Strahler.	66
Tabela 3.3 - Relação de bifurcação.	67
Tabela 3.4 - Parâmetros para o cálculo da Densidade de drenagem.	68
Tabela 3.5 - Tempo de concentração segundo as fórmulas de Témez, Giandotti e Ven Te Chow.	70
Tabela 3.6 - Resumo das características do relevo da bacia.	76
Tabela 3.7 - Resumo das características morfológicas da bacia hidrográfica da Ribeira de Machico.	76
Tabela 3.8 - Proposta de secções a monitorizar e respetivas características.	83
Tabela 4.1 - Características gerais sobre as bacias em estudo, adaptado de [54].	87
Tabela A.1 – Dados para a construção da Curva Hipsométrica Adimensional.	103
Tabela A.2 - Dados para a construção do Perfil Longitudinal.	104

LISTA DE SÍMBOLOS

Siglas

ETA	Estação de Tratamento de Águas
EUA	Estados Unidos da América
IGA	Investimentos e Gestão da Água
IPMA	Instituto Português do Mar e da Atmosfera
IST	Instituto Superior Técnico
LREC	Laboratório Regional de Engenharia Civil
RAM	Região Autónoma da Madeira
SRES	Secretaria Regional do Equipamento Social
SWCB	Soil and Water Conservation Bureau
UMa	Universidade da Madeira

Notação

A	[km ²]	Área
A'	[km ²]	Área entre cotas
A _{alt}	[m]	Amplitude altimétrica
b	[km]	Largura de um retângulo equivalente
D _d	[km/km ²]	Densidade de drenagem
D _h	[cursos de água/km ²]	Densidade hídrica
\bar{H}	[m]	Altura média
i _{10;85}	[m/m]	Declive 10;85
i _{méd}	[m/m]	Declive médio do curso de água principal
I _r	[m/m]	Índice de relevo
k _c	[-]	Índice de compacidade
k _f	[-]	Fator de forma
k _L	[-]	Índice de alongamento
L	[km]	Comprimento total do curso de água principal

L'	[km]	Comprimento de um retângulo equivalente
N_1	[-]	Número de cursos de água de ordem 1
n	[-]	Ordem máxima da bacia
N	[-]	Número total de cursos de água da bacia
N_u	[-]	Número de cursos de água de uma determinada ordem
N_{u+1}	[-]	Número de cursos de água da ordem seguinte
P	[km]	Perímetro
\bar{P}	[km]	Percurso médio do escoamento superficial sobre o terreno até um curso de água
\bar{P}_L	[km]	Percurso médio do escoamento superficial sobre o terreno desde o limite da bacia até um curso de água
R_b	[-]	Relação de bifurcação
\bar{R}_b	[-]	Relação de bifurcação média
t_c	[h]	Tempo de concentração
t_r	[h]	Tempo de resposta
Z_{10}	[m]	Altitude relativa a 10 % do comprimento total do curso de água principal
Z_{85}	[m]	Altitude relativa a 85 % do comprimento total do curso de água principal
Z	[m]	Altitude
\bar{Z}	[m]	Altitude média
$Z_{máx}$	[m]	Altitude máxima
$Z_{mín}$	[m]	Altitude mínima
ΔH	[m]	Diferença máxima de cotas do curso de água principal

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO GERAL

1.1.1. INTRODUÇÃO AO FENÓMENO DAS ALUVIÕES E SUA MONITORIZAÇÃO

As aluviões são um fenómeno relativamente comum e de grande perigosidade em zonas montanhosas um pouco por todo o mundo. São eventos imprevisíveis, e por isso, devastadores, capazes de fluir e inundar vastas extensões. Na Madeira este fenómeno apresenta um grande peso devido às características da ilha: declives acentuados; disponibilidade de material sólido facilmente mobilizável, especialmente depois de eventos de forte precipitação; tempos de concentração muito baixos, facilitando a formação de cheias rápidas; e a edificação de estruturas e de vias de comunicação nos cones de dejeção das ribeiras não contribui para o escoamento do material. Tendo em conta estes fatores, a prevenção do risco e a mitigação das consequências passa pela criação de sistemas de monitorização. Para melhor compreender a temática da monitorização dos cursos de água é necessário antes introduzir os conceitos de aluvião e os fatores inerentes à sua formação.

As aluviões são um tipo de movimento de terras devido à influência da água que ocorrem em zonas montanhosas. Segundo Iverson [29], uma aluvião é um escoamento com material sólido e líquido, dependente da gravidade, com grande capacidade de transporte e grande poder destrutivo. Assim como as cheias, as aluviões são suficientemente líquidas para percorrerem grandes distâncias e inundarem vastas áreas. São uma mistura de lama, areia, pedras e água que efetuam um percurso descendente ao longo de terrenos inclinados ou ravinas segundo a força da gravidade [31], constituindo um dos processos naturais mais devastadores quer para a população quer para o meio envolvente, não só devido à velocidade que atingem mas também devido à capacidade de transporte. Velocidades de cerca de 5 m/s são comuns, mas velocidades superiores também são possíveis, havendo registos de enxurradas que atingiram velocidades de 10 m/s [6]. A Figura 1.1 exemplifica o carácter destrutivo da aluvião de 20 de fevereiro de 2010 que assolou o Funchal, bem como outros concelhos da ilha da Madeira.



Figura 1.1 - Vista da Ribeira de João Gomes na aluvião de 20 de fevereiro de 2010 [52].

Geralmente estes eventos surgem sob a forma de vagas com frentes inclinadas, maioritariamente constituídas por pedras de grande volume e com uma grande concentração de material grosseiro. Atrás da frente tem-se o corpo principal da vaga, com menor teor em pedras de grande volume, constituída por sedimentos do tamanho de seixos, ficando gradualmente liquefeita até que, finalmente, apresenta-se como água lamacenta. Na Figura 1.2 está representado um esquema de uma vaga de uma aluvião. A frente da aluvião tem menos concentração em água quando comparada com a cauda, constituída por material mais fino e com maior percentagem de água. A concentração de sedimentos numa enxurrada varia muito, podendo ir desde os 25 % até aos 80-90 % em volume, enquanto o teor em água é relativamente pequeno, variando entre 10-30 %.



Figura 1.2 - Esquema de uma vaga de um fluxo de detritos, adaptado de [39].

É devido a estas características que as aluviões são consideradas como processos intermédios entre deslizamentos de terras e cheias [6]. É também de salientar que o intervalo de tempo entre vagas pode ser de segundos ou horas, sendo que o total de vagas pode variar entre uma a várias dezenas [39].

Tipicamente formam-se a partir de precipitações intensas, mas na realidade são um conjunto de fatores que estão na sua origem, destacando-se a disponibilidade de material solto, a existência de encostas de declive acentuado, súbitos caudais de água provenientes de chuvas intensas, colapso de canais, condições antecedentes de elevado teor em água, degelo rápido [6], terremotos, erupções vulcânicas [26] e frequência de incêndios [30]. Em qualquer um dos casos, a mobilização de uma aluvião está associada à presença simultânea de material saturado e uma inclinação suficiente para que aconteça a rotura do solo.

São fenómenos com um início súbito, sendo por isso difíceis de prever, e mesmo os eventos mais pequenos podem constituir um perigo para a população e infraestruturas. Por ser um processo que apresenta perigo, é necessário desenvolver medidas que possam de alguma maneira oferecer uma melhor compreensão sobre a sua mecânica, que fatores estão presentes na sua origem, para que, consequentemente, se melhorem e desenvolvam modelos matemáticos de previsão, bem como o desenvolvimento de sistemas de alerta. Assim, é de extrema importância que se conheçam dados de campo relativos aos fluxos de detritos, tais como a velocidade e a profundidade do caudal, a força de impacto e o volume total da massa [5].

São os sistemas de monitorização, automáticos ou não, que permitem estudar os fatores que estão na origem das aluviões e o seu respetivo comportamento. Cada sistema é composto por diversos equipamentos (descritos no Capítulo 2), em que cada um é responsável por analisar e registar diferentes propriedades associadas a este tipo de evento, tais como a velocidade de vibração do solo, registada por geofones, a velocidade da frente da onda, registada por sensores ultrassónicos ou de radar, ou a altura do escoamento, obtida através de câmaras de vídeo.

Nesta dissertação são objetos de estudo diferentes sistemas de monitorização existentes, assim como os vários equipamentos incluídos e as suas aplicações como meio de monitorização de um curso de água.

1.1.2. BREVE REVISÃO HISTÓRICA DE ALUVIÕES NA ILHA DA MADEIRA

As aluviões sempre foram uma constante da história madeirense mas ganharam mais ênfase depois do evento de 20 de fevereiro de 2010, quando 43 pessoas morreram e centenas ficaram desalojadas, tendo-se contabilizado prejuízos na ordem dos 1080 milhões de euros [36].

A primeira aluvião de que há registo na Madeira aconteceu em 1601 [56]: “ (...) a aluvião de 1724 não foi a primeira que causou prejuízos, pois que Mouquet que esteve aqui em 1601, diz, embora não precise datas, «que as águas que descem das montanhas algumas vezes destroem pontes e casas em toda a ilha».”

Quintal, em “*Aluviões da Madeira*” [45], procede a uma descrição e caracterização extensiva das enxurradas que varreram a ilha da Madeira ao longo dos anos. Desde o início do século XIX até fins de 2011 que estão registadas 39 aluviões associadas a deslizamentos de terras e a precipitações intensas, constituindo o tipo de catástrofe natural mais comum, com maior poder destrutivo e que mais mortes causa na região. No século XIX há registo de 8 aluviões, no século XX foram registados 22 eventos e já no século XXI, até ao momento, já aconteceram 9 aluviões. São registos de fenómenos que denotam uma certa variação de intensidade de acontecimento para acontecimento, onde alguns provocaram apenas prejuízos em habitações e vias de comunicação, enquanto outros ameaçaram a vida das populações.

A aluvião mais devastadora do século XIX ocorreu a 9 de outubro de 1803, onde os concelhos mais fustigados foram o Funchal, Santa Cruz e Machico. Segundo o Elucidário Madeirense [56], foram “(...) cerca de mil os indivíduos mortos e desaparecidos (..)” e “(...) seiscentos o número aproximado dos que morreram, sendo a maior parte no concelho do Funchal.” É na sequência deste evento que é realizado o encanamento das ribeiras que atravessam o Funchal (João Gomes, Santa Luzia e São João) por parte do Brigadeiro Oudinot. No entanto, a construção das muralhas não serviu de barreira à turbulência das águas que galgaram as margens em outubro de 1815.

A 3 de novembro de 1956 foram as zonas de Machico, Água de Pena, Porto da Cruz, Santo da Serra e Santa Cruz fustigadas pela violência das águas, havendo registo de seis vítimas mortais. Foram destruídas casas, pontes, terrenos agrícolas e estradas. Só na freguesia do Porto da Cruz foram destruídas quatro pontes, e muitas outras em Machico e Santa Cruz. Em Santa

Cruz a igreja e o edifício do tribunal chegaram a ser inundados. A Figura 1.3 é uma foto da zona adjacente ao edifício do tribunal de Santa Cruz, tirada depois do evento de 3 de novembro, e retrata a agressividade que se fez sentir naquele dia.

A 29 de outubro de 1993 o Funchal foi assolado por fortes precipitações que caíam já desde o dia anterior e que fizeram transbordar as três ribeiras que atravessam a cidade, bem como a Ribeira dos Socorridos. A baixa ficou coberta com lama, pedras e troncos de madeira, tendo ocorrido uma destruição generalizada de edifícios, estradas, corte de água potável durante duas semanas, duas centenas de desalojados e sete mortos. Outros concelhos como Santa Cruz, Machico e Câmara de Lobos também foram afetadas, mas não se verificaram mortes.



Figura 1.3 - Ribeira de Santa Cruz, junto ao edifício do tribunal [45].

Já no século XXI, a aluvião mais grave aconteceu a 20 de fevereiro de 2010, com cerca de 100.000 m³ de material transportado e depositado pelas ribeiras do Funchal [55]. Foram várias as zonas da ilha, principalmente na costa sul, e os sectores afetados, desde vias de comunicação, sistemas de comunicação, habitações, abastecimento de água, cortes de energia, bem como o sector do comércio.

Dos meses em que ocorreram as aluviões, outubro foi o mês com mais incidências, com 11 ocorrências, enquanto o mês de abril teve apenas uma. A Figura 1.4 ilustra a frequência das aluviões distribuídas ao longo dos meses, entre 1803 e 2011.

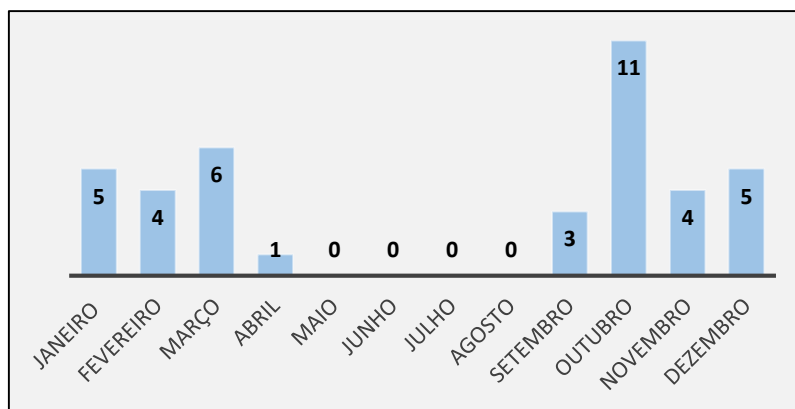


Figura 1.4 - Frequência de aluviões entre 1803 e 2011, adaptado de [46].

1.2. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho tem por objetivo o estudo e investigação de sistemas de monitorização automática que possam contribuir para a previsão da formação de aluviões de maneira a poder intervir atempadamente junto dos órgãos de segurança adequados. Para além da pesquisa de soluções de monitorização é também objeto de análise as vantagens e desvantagens dos diversos equipamentos de monitorização, bem como a apresentação de soluções concretas para uma bacia hidrográfica da Ilha da Madeira. Como objetivo final há o acompanhamento do sistema de monitorização a ser implementado pelo LREC.

1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está estruturada segundo cinco capítulos, sendo eles a Introdução, a Análise do Estado de Arte, a Aplicação de um Sistema de Monitorização Automático a uma Bacia Hidrográfica da RAM, o Sistema de Monitorização do LREC – Caso de Estudo e, por fim, a Conclusão. Estão também presentes as Referências bibliográficas, assim como três anexos.

No capítulo 1 é realizada uma breve introdução às aluviões, as suas características e que fatores estão na sua origem e é feita uma breve introdução aos sistemas de monitorização. É apresentada uma revisão histórica das aluviões na Ilha da Madeira, seguindo-se os objetivos do trabalho e a respetiva organização.

No capítulo 2 é descrito o papel dos sistemas de monitorização no âmbito das aluviões, são identificados os tipos de equipamentos que fazem parte dos sistemas de monitorização e as

respetivas vantagens e desvantagens, sendo, por fim, apresentados alguns exemplos de sistemas de monitorização existentes.

No capítulo 3 é realizada a caracterização biofísica da bacia hidrográfica em estudo, estando descritos aspetos relativos ao enquadramento geográfico, à geomorfologia, à geologia e solos, à cobertura vegetal, à precipitação e ocupação do solo. Segue-se uma análise morfológica que engloba aspetos referentes às características geométricas da bacia, às características da rede de drenagem e às características do relevo. Por fim, é proposto um sistema de monitorização para uma bacia hidrográfica da região, onde são descritos os tipos de equipamentos utilizados e as suas localizações.

No capítulo 4 é efetuada uma descrição do sistema de monitorização a ser desenvolvido pelo LREC.

No capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões da dissertação e as sugestões para possíveis trabalhos futuros.

Capítulo 2

ANÁLISE DO ESTADO DE ARTE

2.1. SISTEMAS DE MONITORIZAÇÃO DE ALUVIÕES

Os sistemas de monitorização podem funcionar como uma ferramenta importante para o estudo das aluviões, permitindo registar informações essenciais acerca da iniciação e do comportamento destes fenómenos ao longo do seu percurso, bem como acerca do processo de deposição. Através da monitorização é possível alertar as entidades competentes sobre um desastre iminente, como também desenvolver modelos computacionais de previsão de futuros eventos [23],[28]. Um aspeto importante é desenvolver um sistema fiável e robusto que possa ser adaptado ao curso de água em questão de maneira a poder funcionar como um sistema de prevenção.

Tradicionalmente, as medidas de proteção são mais orientadas para a execução de infraestruturas, como sistemas de proteção de encostas contra quebradas, estruturas para contenção de material sólido e muros ao longo dos canais. No entanto, nos anos oitenta começou-se a pensar na prevenção em termos de monitorização contínua e de idealização de sistemas de alerta como alternativa à construção [22]. Desde essa altura que se tem vindo a melhorar e a desenvolver as tecnologias envolvidas na monitorização, tendo a sua aplicação se tornado bastante vantajosa numa análise custo-benefício. Assim, os sistemas de monitorização desempenham um papel fundamental como medida não estrutural na prevenção destes fenómenos destrutivos e na mitigação das suas consequências.

2.1.1. EQUIPAMENTOS CONSTITUINTES DE UM SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO DE ALUVIÕES

São vários os equipamentos utilizados na instrumentação de aluviões e dos canais por onde esta circula. Itakura *et al.* [28] realizaram um compêndio de equipamentos e métodos, bem como os parâmetros que tais equipamentos conseguem registar. De acordo com estes autores, os sensores de fio, os sensores ultrassónicos, os sensores de vibração do solo e as técnicas de processamento de imagem são os equipamentos indicados para a deteção da

aproximação de uma aluvião. Enquanto os sensores ultrassónicos são capazes de determinar a profundidade e a velocidade do fluxo, os sensores de vibração do solo e algumas técnicas de processamento de imagem podem estimar o caudal transportado pelo curso de água.

As páginas seguintes descrevem os equipamentos mais utilizados em diversas estações de monitorização, tais como, geofones, sensores ultrassónicos, sensores com tecnologia de radar, equipamentos para medição e registo da precipitação e câmaras de vídeo. Depois desta descrição serão apresentadas as vantagens e desvantagens de cada aparelho na temática das aluviões e monitorização de cursos de água, bem como as aplicações dos aparelhos como ferramentas de monitorização.

A Tabela 2.1 identifica um conjunto de parâmetros que poderão ser estudados ao analisar as aluviões, assim como os sensores normalmente utilizados para os medir.

Tabela 2.1 - Parâmetros utilizados na caracterização das aluviões e respetivos sensores, adaptado de [6].

Parâmetros	Sensores utilizados
Altura do escoamento	<ul style="list-style-type: none"> ○ Sensores de fio; ○ Sensores ultrassónicos; ○ Câmaras de vídeo.
Profundidade em função do tempo	<ul style="list-style-type: none"> ○ Sensores ultrassónicos; ○ Sensores de radar.
Vibrações do solo	<ul style="list-style-type: none"> ○ Sismómetros ou geofones.
Velocidade média	<ul style="list-style-type: none"> ○ Sensores ultrassónicos; ○ Geofones.
Velocidade superficial	<ul style="list-style-type: none"> ○ Velocímetros eletromagnéticos baseados no efeito de Doppler; ○ Câmaras de vídeo.
Sons subterrâneos	<ul style="list-style-type: none"> ○ Microfones.
Pressão intersticial	<ul style="list-style-type: none"> ○ Sensores de pressão.
Força de impacto	<ul style="list-style-type: none"> ○ Sensores piezoelétricos.

2.1.1.1. GEOFONES

Uma das características associadas às aluviões é o ruído que estas provocam e as vibrações que induzem ao solo. Estas vibrações, geradas através da colisão de pedregulhos ou entre a colisão do material rochoso com o leito do canal por onde este circula, podem ser medidas através de sismómetros (Figura 2.1A), geofones (Figura 2.1B), acelerómetros ou sensores acústicos.

Os geofones são equipamentos que detetam ondas sísmicas, sendo colocados, normalmente, à superfície do terreno ou enterrados, e convertem a energia sísmica em tensão elétrica, sendo a tensão elétrica proporcional à velocidade de oscilação do solo. São o tipo de sensores mais comumente utilizados para a monitorização de aluviões de acordo com [1],[7], funcionando maioritariamente como ativadores de outros sensores de monitorização ou como método de deteção do fenómeno em sistemas de alarme. Conseguem detetar vibrações provenientes de diversas fontes, entre as quais fluxos de detritos [1], terremotos próximos aos geofones, trovoadas, vento em árvores e tráfego humano e motorizado [65]. Podem fazer leituras que, uma vez analisadas, conseguem localizar a posição inicial do movimento e assim prever a sua direção [32].

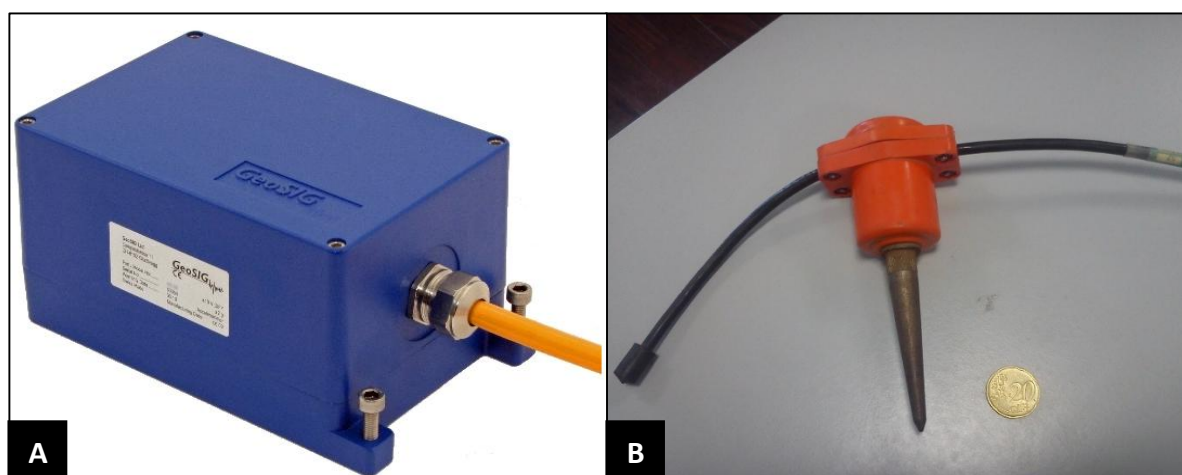


Figura 2.1 - Sensores de vibração do solo: A: Sismómetro [21] e B: Geofone.

Os sismómetros, assim como os geofones, detetam as vibrações do solo, mas a diferença reside no intervalo de frequências que cada aparelho consegue detetar: os sismómetros são mais sensíveis a vibrações e funcionam no intervalo de 0.001 a 500 Hz [24], enquanto os geofones ficam-se pelo intervalo de 10 a 300 Hz [1].

A passagem da frente de uma aluvião provoca um aumento súbito da velocidade de vibração do solo com um pico com duração de alguns segundos. A Figura 2.2 representa um registo sísmico onde é possível diferenciar a passagem da onda principal e de ondas secundárias de velocidade menor.

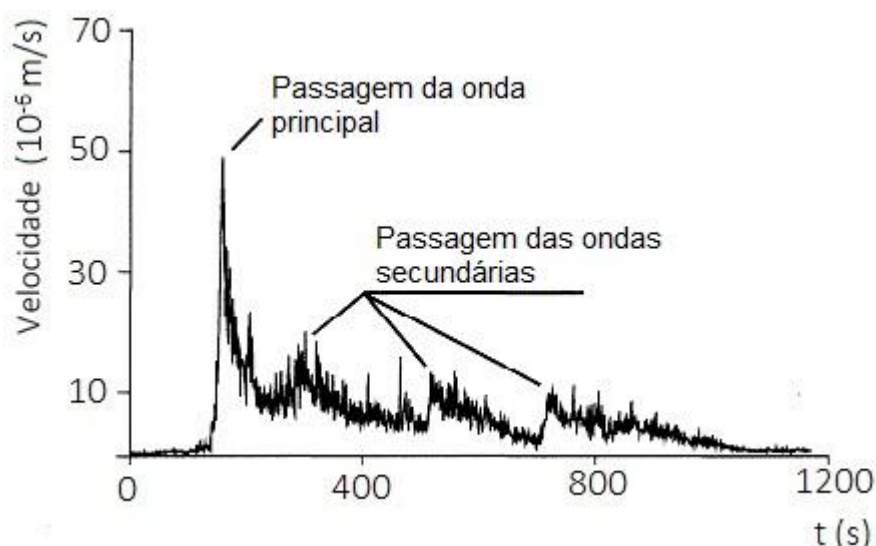


Figura 2.2 - Velocidade média de vibração do solo em função do tempo, adaptado de [3].

Existem três importantes fatores que afetam as vibrações registadas pelos sensores: a distância entre o sensor e o local por onde circula a torrente; características do estrato onde o sensor está colocado e entre a localização do sensor e o canal; e o tipo de montagem do sensor [1].

Os geofones devem ser colocados, no máximo, a algumas dezenas de metros do canal ou das suas margens, uma vez que as ondas de vibração atenuam com a distância e estas não percorrem longas distâncias. Dependendo das características do material onde o sensor está localizado, a velocidade de vibração difere: em zonas aluvionares a velocidade das ondas P (tipo de onda sísmica; é aquela que chega primeiro ao sensor [43]) é cerca de 350 m/s e em material rochoso chega até 700 m/s.

No que respeita à montagem do sensor, é necessário considerar dois aspetos: o tipo de material em que o sensor está colocado e a montagem do sistema. As especificações dos geofones normalmente limitam o ângulo de montagem a um valor específico, dependendo da direção em que a vibração for medida. Como as superfícies de montagem são muitas vezes irregulares, diferentes soluções de montagem são implementadas nas estações de monitorização. Os geofones colocados dentro de uma estrutura (ex.: caixa metálica), vide Figura 2.3A, são afetados no que respeita ao sinal registado, pois a própria estrutura também vibra. No entanto, tem a vantagem de proteger o equipamento contra as condições atmosféricas ou animais. Os que são colocados diretamente no solo não sofrem alterações no sinal (Figura 2.3B e Figura 2.3C), mas estão sujeitos ao desgaste.

Os equipamentos assentes sobre estruturas de betão também sofrem alterações quanto ao sinal registado, estes são menos sensíveis às vibrações causadas pelas aluviões do que os colocados diretamente no solo. As frequências de vibração são afetadas pois a própria estrutura também tem a sua frequência.

Os geofones conseguem detetar vibrações com frequências entre os 10 e 300 Hz (as frequências típicas das vibrações do solo mais fortes provocadas pela passagem de uma aluvião correspondem a um intervalo de cerca de 20 a 50 Hz) [1]. No entanto, o sinal registado pelos geofones depende das características do geofone, bem como de outros fatores relacionados com a colocação do aparelho, já mencionado anteriormente. Quanto maior for a frequência das vibrações do solo mais depressa estas atenuam com a distância, logo geofones com maior frequência são mais sensíveis às vibrações provenientes do canal de onde estes estão colocados.

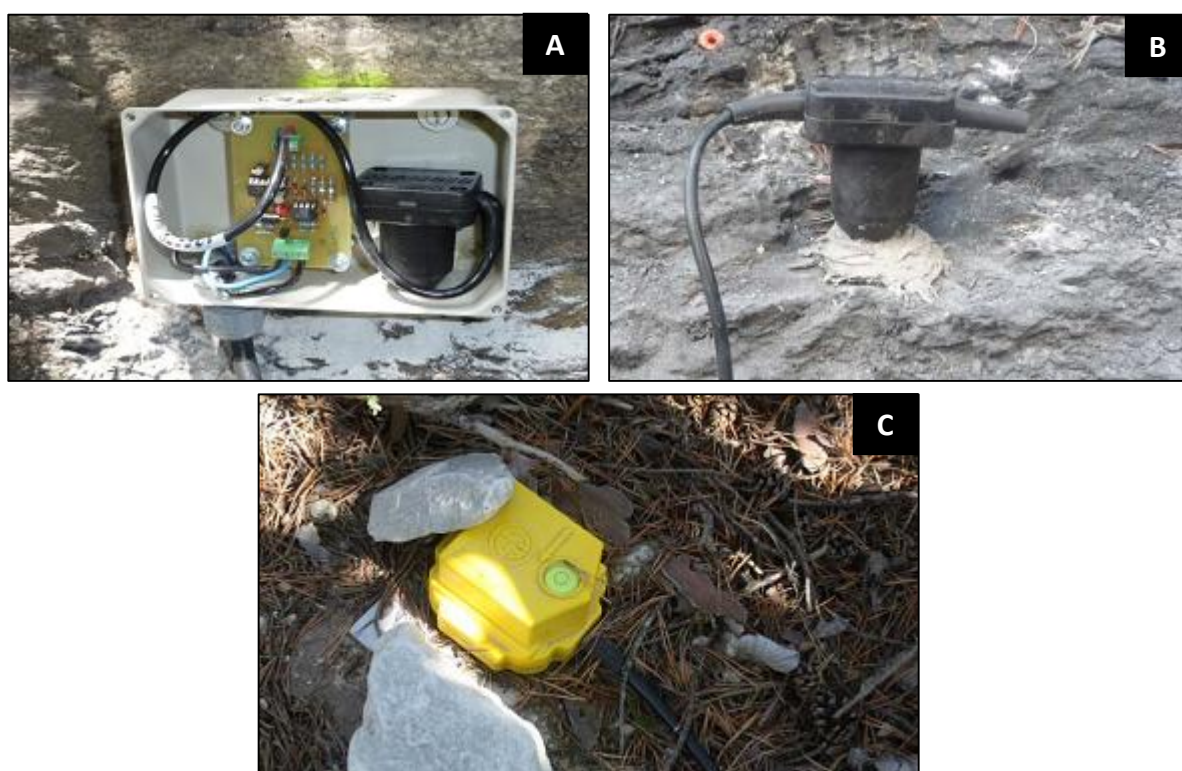


Figura 2.3 - Montagem dos sensores: A: fixados numa caixa metálica; B: fixados diretamente ao solo e C: pregado ao solo [1].

Como referido anteriormente, os geofones são utilizados normalmente como sensores que ativam outros equipamentos de monitorização, sendo por isso necessária a definição de valores limites de vibração que, ao serem ultrapassados sejam interpretados como o início de

uma aluvião. Para este efeito é utilizado um algoritmo que verifica as variações do sinal do geofone que possam indicar a ocorrência de um evento. Assim, é comum existirem duas frequências de registo: uma frequência mais baixa, utilizada para o “modo normal”, ou seja, quando não há registo de ocorrência de uma aluvião, e uma outra frequência, mais alta, para o “modo de evento”.

Geralmente os valores limites são estabelecidos com base em análises empíricas, através da experiência de técnicos e investigadores, como também são definidos para cada geofone, dependendo do local onde estão colocados. No entanto, a definição destes limites ainda é um assunto que deixa muitas questões em aberto, pois são poucos os estudos feitos relativos à influência que o local induz sobre a vibração causada pelas aluviões [2].

A definição dos valores limites é essencial para a deteção das aluviões. Estes devem ser definidos de maneira a que as vibrações induzidas pelo ruído, como a passagem de veículos, sejam ignoradas e as vibrações provocadas pela passagem da aluvião sejam preservadas. De maneira a satisfazer estas duas condições, a definição dos valores limites deve ser realizada em cada ponto de localização do geofone, tendo em conta os fatores que influenciam a colocação dos equipamentos, descritos previamente.

A título de exemplo, nos Pirenéus Centrais, em Rebaixader, foi instalado um sistema de monitorização experimental, constituído por diversos equipamentos, entre estes, geofones. Foram definidos valores limites capazes de emitir um alerta em caso de aluvião. Entre agosto de 2009 e dezembro de 2012 o “modo de evento” foi acionado 363 vezes [2]. A maior parte dos avisos (216) ocorreram devido ao mau funcionamento de um dos geofones devido a uma quebrada em 2010, enquanto 126 avisos aconteceram devido a pequenos movimentos de vertente. Dos 363 eventos detetados, apenas 21 foram considerados como eventos de interesse.

O ruído proveniente do meio envolvente ao sensor pode ser evitado através da cravação do geofone o mais profundo quanto possível, longe de árvores ou postes que induzam vibrações ao solo, ou de outros fatores, como a passagem de veículos motorizados [33].

Como já mencionado, o sinal de saída dos geofones é uma tensão diretamente proporcional à velocidade de vibração do solo. A tensão de saída é um sinal analógico, *vide* Figura 2.4, que necessita ser convertido num sinal digital antes de ser registado no *data logger*. Depois de

digitalizado, o sinal é processado, o que reduz a quantidade de dados guardados no *data logger*.

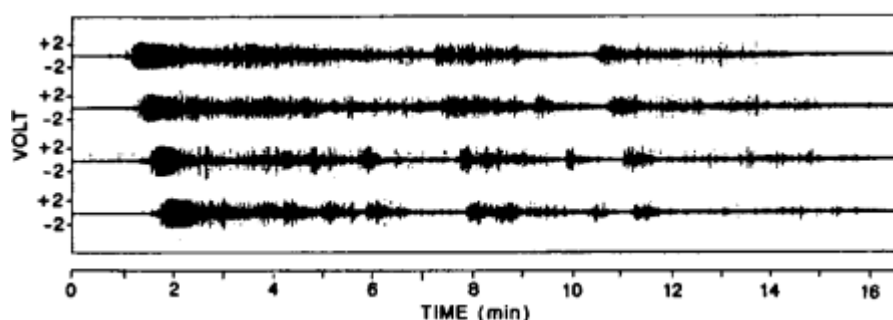


Figura 2.4 - Sinal de saída analógico de 4 geofones na Torrente de Moscardo para uma aluvião [8].

O sinal de saída do geofone deve ser processado pois [8]:

- É possível reduzir a quantidade de dados guardados no *data logger*;
- Facilita a identificação de algoritmos necessários à detecção da chegada de uma aluvião e da sua ocorrência, que de outra maneira não poderiam ser concretizados através do sinal analógico;
- Útil na identificação das principais características do fenómeno que não são imediatamente reconhecidas pelo sinal bruto, tais como a frente principal, ondas secundárias ou a forma da onda;
- Permite a distinção entre fluxos de detritos e outros tipos de fenómenos como cheias ou quedas de pedras (*vide* Figura 2.5).

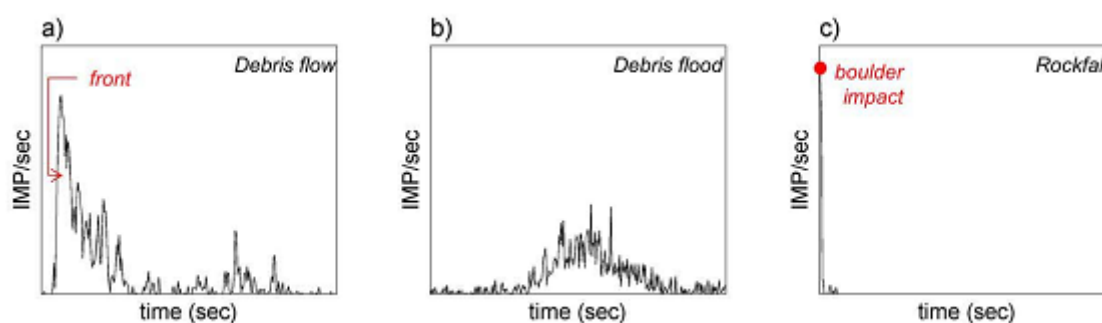


Figura 2.5 - Sinal processado pelo método dos impulsos para uma aluvião (a), para uma cheia (b) e para uma quebrada (c) [8].

Existem pelo menos dois métodos de processamento que deverão ser adotados para analisar o sinal de saída de qualquer geofone: um método baseado no cálculo de impulsos (método

dos impulsos) e outro baseado no cálculo da amplitude do sinal (método da amplitude) [8], cada um deles com as suas diferenças, vantagens e desvantagens, expostas seguidamente.

Método da amplitude

Foi usado, inicialmente, em 1999 na Torrente de Moscardo, cujo sistema de monitorização será descrito posteriormente, e consiste no cálculo da média dos valores absolutos, para cada segundo de gravação. Através da utilização deste método, os investigadores chegaram à conclusão que o cálculo da amplitude tornar-se-ia útil na identificação das diversas ondas de uma aluvião (incluindo a onda principal e as ondas secundárias), após comparação com o gráfico do nível de escoamento, registado por um sensor de nível. A Figura 2.6 representa uma comparação feita entre o gráfico resultante dos dados dos sensores ultrassónicos e o gráfico da amplitude *versus* tempo das vibrações do solo. É possível identificar semelhanças, nomeadamente a presença de um pico bem definido no sinal sísmico, correspondente à passagem da onda principal, também registada pelos sensores de nível, correspondendo ao valor máximo da altura de escoamento.

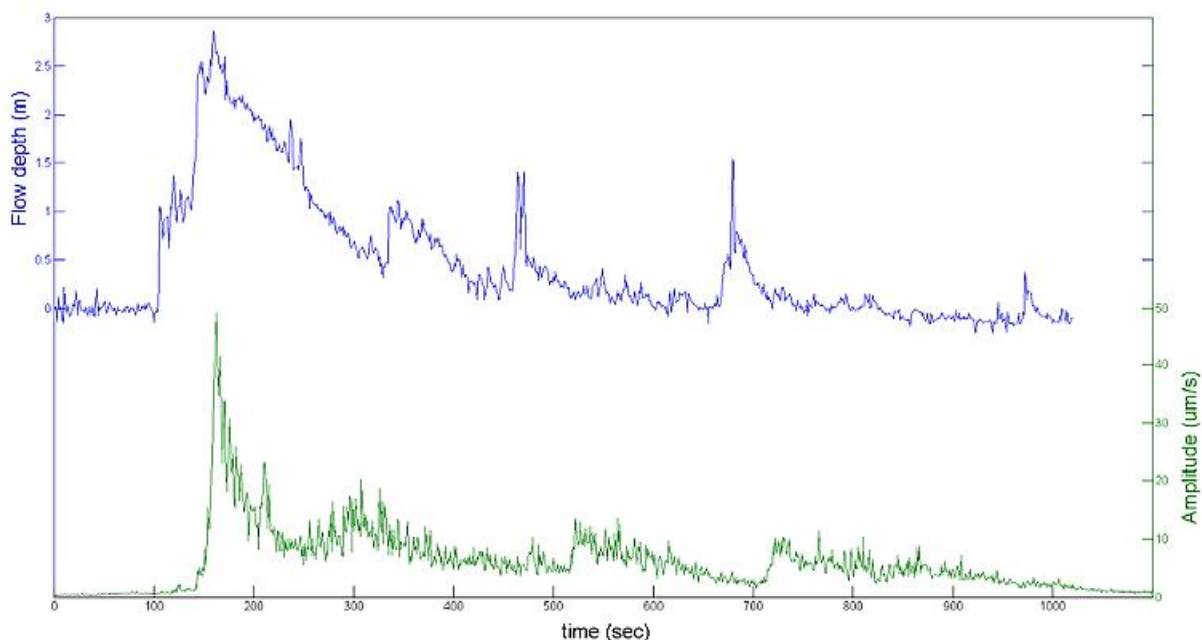


Figura 2.6 - Comparação entre os registos gráficos correspondentes aos níveis de escoamento pelos sensores ultrassónicos (a azul) e à amplitude do sinal sísmico (a verde), na Torrente de Moscardo [8].

Para além das semelhanças verificadas entre os registos, o método da amplitude permite a diminuição do consumo de energia do sistema e simplifica a análise dos dados, permitindo

mais facilmente a implementação de algoritmos para a detecção de aluviões baseados no sinal do geofone.

Contudo, existem algumas falhas neste método, pois existe uma perda fundamental de informação respeitante ao sinal registado: a informação sobre a frequência do sinal torna-se indisponível após o cálculo da amplitude; quanto à intensidade do sinal, apenas o seu valor médio é calculado, não havendo informação acerca dos valores máximos após a transformação.

Método dos impulsos

O método dos impulsos aplicado a fluxos de detritos foi implementado nos anos 90, tendo sido utilizado anteriormente, nos anos 80, para a monitorização do transporte de materiais em cursos de água. Consiste na transformação do sinal de saída do geofone em impulsos, onde os impulsos são registados num *data logger* e um contador guarda o número de impulsos por segundo. A transformação em impulsos tem dois objetivos: filtrar o ruído sísmico e simplificar o sinal.

A principal limitação deste método diz respeito à necessidade de calibrar corretamente o limite para a contagem dos impulsos: um limite muito baixo impede a distinção entre as diferentes ondas e a sua dimensão. Por outro lado, a escolha de um limite demasiado alto pode revelar as proporções corretas entre as diversas ondas do fluxo, mas aquelas mais pequenas poderão deixar de ser identificadas. Uma outra limitação é o facto que devido à transformação da vibração em impulsos, a informação em relação ao teor da frequência ou amplitude é perdida [8].

Como vantagens apresenta as mesma que o métodos da amplitude e permite, ainda, a filtração do ruído de fundo, algo que o método da amplitude não faz.

Vantagens

- Robustez;
- Baixo consumo;
- Podem ser instalados a uma certa distância do local a monitorizar, estando protegidos da aluvião;

- Não são necessárias estruturas especiais para serem montados;
- A visibilidade não é um fator preponderante na escolha da localização.

Desvantagens

- Baixa capacidade de armazenamento de informação [1];
- Custo relativamente elevado;
- Dificuldade na definição dos limites de aviso, pois estes podem ser influenciados devido a outras fontes que não a passagem da aluvião pelo percurso que está a ser monitorizado, entre elas, a passagem de camiões e a queda de pedras;
- A necessidade de filtrar o sinal pode aumentar a complexidade do sistema [6];
- Dificuldade na escolha do local ótimo para a colocação do equipamento;
- As vibrações só conseguem ser detetadas a uma distância relativamente pequena à localização do geofone. Isto coloca problemas em sistemas de alerta que estão dependentes da deteção destas vibrações com uma determinada antecedência.

No mercado de sensores de vibração do solo, são várias as empresas que se dedicam à distribuição deste tipo de equipamentos. Entre estas, destacam-se a *Geospace Technologies*, a *ION*, a *GeoSIG*, a *DTCC Dynamic Technologies* e a *Sercel*.

2.1.1.2. SENSORES ULTRASSÓNICOS

Os sensores ultrassónicos são, provavelmente, dos equipamentos mais utilizados para a monitorização contínua do nível dos fluxos de detritos, podendo, para além de registar os gráficos do nível da corrente (Figura 2.7) analisar o estado de erosão do canal [6].

O princípio de funcionamento dos sensores ultrassónicos baseia-se na emissão de um som sob forma de pulso que é refletido quando este encontra um material. O som refletido é então recebido pelo sensor. O tempo para que o feixe do sensor ultrassónico chegue ao material e volte para trás é diretamente proporcional à distância entre o sensor e o material em causa [49]. A deteção por parte dos sensores é afetada por determinados fatores [59] respeitantes ao material a monitorizar, como as características da superfície, a distância ao sensor, o tamanho e o ângulo.

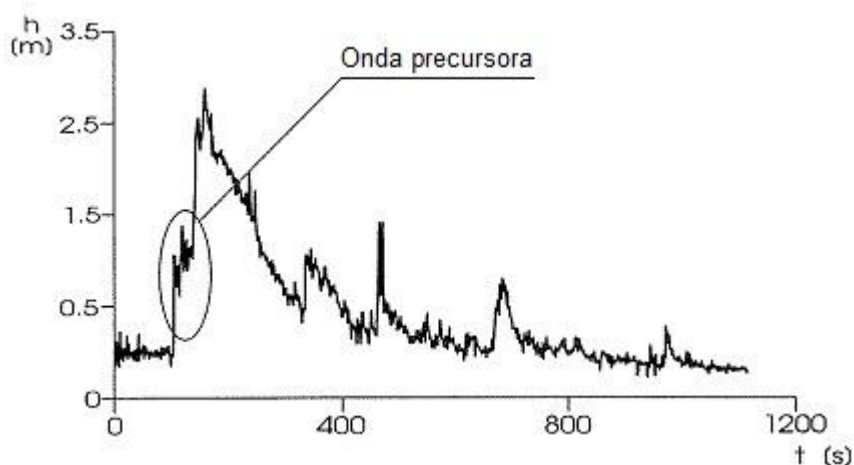


Figura 2.7 - Gráfico de uma aluvião na Torrente de Moscardo, adaptado de [7].

A correta montagem do equipamento é importante para assegurar que as ondas sonoras são refletidas perpendicularmente para o sensor, pois o menor desalinhamento do sensor pode provocar uma redução da onda detetada pelo transdutor [60].

A zona de instalação do sensor deve estar relativamente livre de obstáculos como suportes ou escadas de maneira a minimizar falsos retornos e a resultante deteção de dados errados.

Estes sensores são colocados sobre o canal (*vide* Figura 2.8) e registam a distância que separa o nível da corrente e o respetivo sensor, sendo possível desta maneira registar os gráficos do perfil de escoamento da aluvião. No entanto, devido às variações bruscas do nível com o passar do tempo, típicas de uma aluvião, são necessários tempos de registo muito mais curtos entre duas gravações sucessivas, logo é necessário um aparelho com uma maior capacidade de memória.



Figura 2.8 - Sensor ultrassónico colocado num canal de superfície livre [25].

Outro aspeto a ter em conta é o facto de os sensores ultrassónicos terem de ser colocados sobre o canal, o que os torna mais suscetíveis a estragos, e, se as margens do canal forem instáveis, a sua colocação pode tornar-se morosa e difícil. Como vantagem apresentam a facilidade de definição de níveis de alerta: numa secção do canal de dimensões conhecidas é possível estabelecer um nível crítico da altura do escoamento que, caso seja ultrapassado, implica a emissão de um alerta.

Com este equipamento é também possível determinar a velocidade média da frente da vaga [5],[6]. Através da colocação de um par de sensores a uma distância conhecida, a velocidade média da frente é determinada como sendo o *ratio* da distância entre os sensores e o intervalo de tempo que decorreu entre a passagem da frente nos dois locais instrumentados, assim como representado na Figura 2.9.

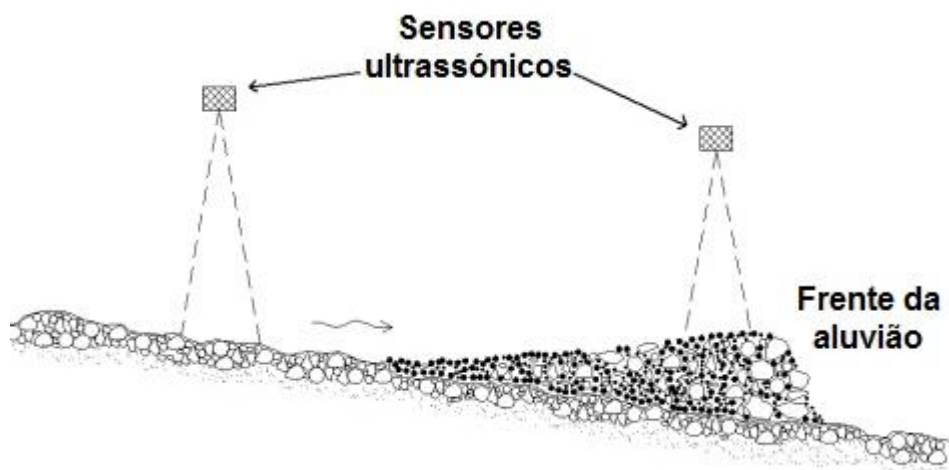


Figura 2.9 - Esquema de medição da velocidade por parte dos sensores ultrassónicos, adaptado de [6].

O intervalo de frequências dos sensores ultrassónicos é de 20-200 kHz, sendo mais típico o intervalo de 40-50 kHz.

Vantagens

- A resposta do sensor não está dependente da cor da superfície ou da refletividade do material;
- São capazes de detetar a maior parte dos materiais com refletividade acústica suficiente;
- Facilmente instalados numa ponte ou numa estrutura sobre a água;
- Não estão em contacto com o material a monitorizar;

- Pouco sujeitos a sujidade ou corrosão;
- Baixo custo e elevada funcionalidade;
- Relativo baixo consumo de energia.

Desvantagens

- Podem ser falsamente acionados devido a ruídos altos;
- Para uma deteção eficaz, cada tipo de sensor requer uma área mínima de superfície;
- Têm uma distância mínima de alcance;
- A distância máxima à superfície do nível da água é cerca de 9 m ou menos;
- Sensibilidade a mudanças de temperatura, pressão, humidade e a partículas suspensas no ar;
- Superfícies lisas refletem mais facilmente a energia que superfícies rugosas, no entanto, o ângulo de deteção de uma superfície lisa é mais crítico que o mesmo relativo a uma superfície rugosa;
- A presença de detritos, nevoeiro, espuma ou elevada turbulência na água pode provocar leituras menos exatas;
- Concentrações elevadas de material fino em suspensão podem causar a dispersão e absorção da onda sonora, evitando a sua reflexão;
- Geralmente requerem mais energia que outros sensores de medição do nível da água;
- A acumulação de água na cabeça do sensor ou a simples condensação podem provocar problemas de funcionamento.

De entre as empresas especializadas neste tipo de equipamento salientam-se a *Automation Products Group*, a *Stevens Water Monitoring Systems* e a *Xylem Global Water*.

2.1.1.3. SENSOR COM TECNOLOGIA DE RADAR

Radar é um acrónimo de *Radio Detecting and Ranging*. É um aparelho que transmite e recebe energia eletromagnética sob a forma de ondas rádio como forma de detetar e estimar a distância e/ou a velocidade de um objeto. Tal como o sensor ultrassónico, o princípio de funcionamento é em todo semelhante: é transmitido um sinal através do ar por parte do sensor para o líquido e o tempo que o eco demora a voltar é registado de maneira a fornecer

um registo contínuo do nível. Podem, igualmente, ser suspensos sobre o canal, como está representado na Figura 2.10.



Figura 2.10 - Sensor radar colocado num canal da bacia de Illgraben, Suíça [12].

O sensor radar de nível tem a mesma utilidade que o sensor ultrassónico: medir o nível da torrente numa determinada secção do canal e determinar a velocidade média das frentes das vagas de uma aluvião.

Vantagens

- Não estão em contacto com o material a monitorizar;
- Não requerem grandes cuidados de manutenção;
- Equipamentos com maior alcance;
- Geralmente mais precisos que os sensores ultrassónicos;
- Melhor performance em relação aos sensores ultrassónicos na deteção através de pó, vapor e espuma;
- Não são afetados significativamente por variações de temperatura ou precipitações moderadas.

Desvantagens

- São sensíveis à acumulação de partículas na superfície do sensor;
- Dependendo da densidade do neveiro, não conseguem devolver medições fiáveis;
- Não conseguem medir a interface entre dois líquidos que não se misturam como a água e o óleo;
- Custo elevado: o custo aumenta com o aumento da precisão.

No mercado de sensores de radar, são várias as empresas que se dedicam à distribuição deste tipo de equipamentos. Entre estas, destacam-se a *Campbell Scientific*, a *Stevens Water Monitoring Systems* e a *OTT Hydromet*.

2.1.1.4. EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO E REGISTO DA PRECIPITAÇÃO

Uma vez que muitas das aluviões têm na sua origem precipitações intensas [54], importa registar e caracterizar os níveis de precipitação e, com base nestes, definir os níveis críticos que poderão originar fluxos de detritos. No entanto, estes níveis críticos são suscetíveis a uma elevada probabilidade de falsos alarmes, pois não são todas as tempestades que ao excederem os níveis originarão uma aluvião [6]. Na Madeira, o registo da precipitação é elaborado por três entidades distintas: LREC, Investimentos e Gestão da Água (IGA) e Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA).

A precipitação é definida como o produto líquido ou sólido da condensação de vapor de água que atinge a superfície terrestre. Incluem-se chuva, neve, granizo, orvalho, geada e neveiro como variantes da precipitação. O total de precipitação que atinge o solo num determinado período de tempo é expresso em termos de coluna vertical de água que atingiria uma projeção horizontal da superfície terrestre e é registado, normalmente em milímetros (volume/área) para precipitação líquida, e em centímetros para neve.

A precipitação é definida com base no seu total, na sua duração e na maneira como se distribui no espaço e no tempo, isto é, a quantidade de precipitação só tem significado quando associada a uma duração. A título de exemplo, 100 mm pode representar pouco para um mês da estação húmida, mas já é muito se ocorrer num dia e uma excecionalidade se verificado numa hora [50]. Na Madeira, a 20 de fevereiro de 2010, ocorreu uma excecionalidade. Na

estação do Areeiro foram registados 47 mm em 10 min e em 1 h já tinham precipitado 140 mm. A Tabela 2.2 apresenta os valores máximos de precipitação para os períodos de 10 min, 1 h, 12 h e 24 h de algumas estações da Madeira [54].

Tabela 2.2 - Precipitações máximas de alguns postos a 20 de fevereiro de 2010 [54].

Posto	10 min [mm]	1 h [mm]	12 h [mm]	24 h [mm]
Areeiro	47	140	334	352
Bica da cana	13	66	278	295
Camacha	25	114	339	352
LREC	11	52	185	191
Pico das pedras	6	10	123	128
Trapiche	20	99	327	341

Os aparelhos que quantificam a precipitação dividem-se em dois grupos: aqueles que medem a precipitação (exemplo dos udómetros) e os que a registam (exemplo dos udógrafos de báscula) [50]. Qualquer equipamento de registo/medição da precipitação deverá ter como objetivo conseguir captar uma amostra que seja representativa da precipitação efetiva sobre uma determinada área. Um dos primeiros pontos a ter em conta será a localização do equipamento. O número de aparelhos e o sítio determinam o quão eficaz são as medições de precipitação da zona.

Alguns aspetos deverão ser tidos em conta no planeamento da localização dos aparelhos:

- Deverá ser escolhido um sítio abrigado, mas não muito abrigado de maneira a que os obstáculos circundantes não afetem a precipitação recolhida;
- Deve estar abrigado contra a ação do vento;
- A altura da boca do udómetro em relação ao solo deverá estar compreendida entre os 0.5 m e 1.5 m;
- Não deverão ser colocados objetos a uma distância inferior a duas vezes a altura do obstáculo acima do orifício do aparelho (Figura 2.11);
- Para cada local deverá ser estimado o ângulo vertical médio dos obstáculos;
- Deverá ser evitada a localização dos equipamentos em inclinações ou na cobertura de edifícios;

- A superfície envolvente ao equipamento poderá estar revestida com relva ou cascalho, pois superfícies lisas e duras como betão provocam salpicos da precipitação.

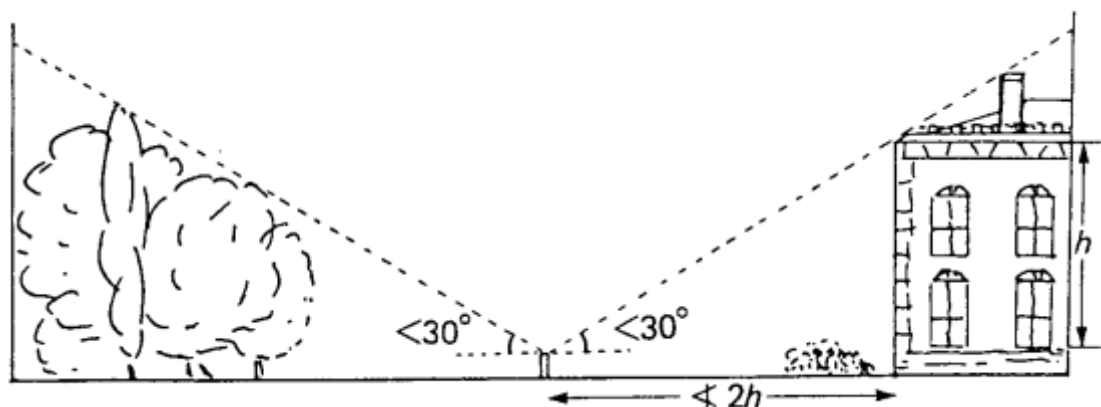


Figura 2.11 - Instruções de localização de um equipamento de medição da precipitação [50].

2.1.1.4.1. UDÓMETROS

Os udómetros ou pluviómetros são equipamentos que medem a precipitação, ou seja, permitem a medição discreta/pontual da precipitação acumulada no seu local de implantação, constituindo o método mais simples e mais económico para a medição da precipitação. São normalmente constituídos por [50]:

- Anel circular que limita a área de receção (1);
- Funil cuja projeção constitui a superfície recetora, normalmente entre 100 e 1000 cm² (2);
- Recipiente para acumulação de água (3);
- Proveta graduada (4).

A Figura 2.12 ilustra os tipos de udómetros habitualmente utilizados em Portugal para a medição da precipitação.

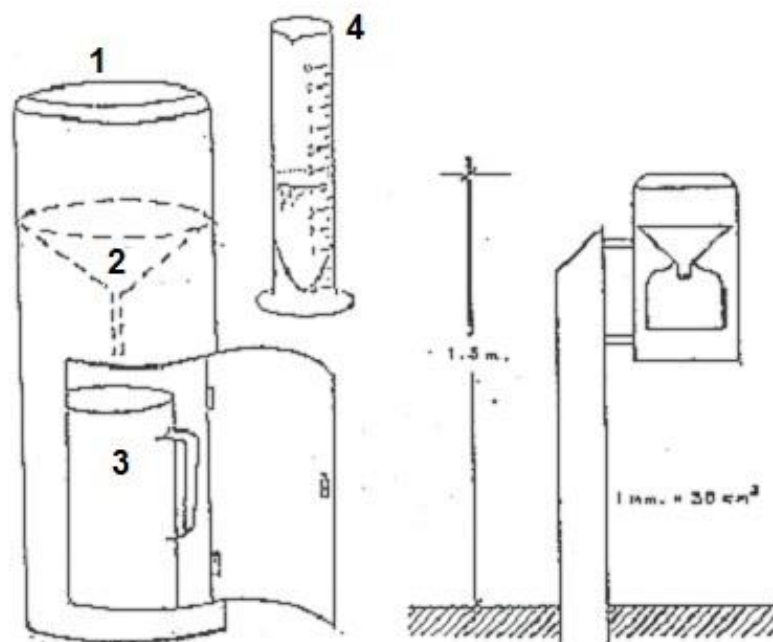


Figura 2.12 - Esquema de um udómetro [50].

A precipitação é recolhida pelo funil e é depois encaminhada para o recipiente para posteriormente ser analisada a sua quantidade. As medições são realizadas diariamente às 09:00 h GMT, através de um técnico que se desloca ao local, correspondendo os valores das medições aos valores acumulados nas 24 h anteriores, em que o parâmetro medido é a precipitação diária. O recipiente é posteriormente esvaziado manualmente pelo técnico.

Ao realizar as medições, a proveta deve ser mantida na vertical, deverão evitar-se erros de paralaxe e a referência para medição da precipitação deverá ser a parte inferior do menisco da água [42].

São aparelhos que têm uma capacidade limitada, isto é, o recipiente para acumulação de água tem as suas limitações e em situações de precipitação intensa podem não ter capacidade suficiente para armazenar a água para posterior leitura. Outro aspeto menos positivo é o fato dos animais por vezes construírem ninhos nestes aparelhos, como aconteceu na estação meteorológica flutuante da barragem do Alqueva, como ilustrado na Figura 2.13.



Figura 2.13 - Ninho de pássaro num udómetro da estação meteorológica flutuante do Alqueva [58].

2.1.1.4.2. UDÓGRAFOS

Os udógrafos ou pluviógrafos são aparelhos que fazem o registo contínuo da precipitação. Nestes aparelhos a proveta graduada é substituída por mecanismos de registo gráfico (ex.: tambor). São utilizados para determinar as horas de começo e fim de precipitação e para determinar a intensidade da chuva em qualquer momento [42]. Antigamente o registo por parte dos udógrafos era representado em papel e devolvia um udograma, mas esta “tecnologia” tornou-se obsoleta. Atualmente os dados já são digitais e enviados para uma estação de monitorização. Embora existam vários tipos de udógrafos, tais como o udógrafo de báscula, o udógrafo de sifão e o udógrafo de balança, apenas será descrito o udógrafo de báscula por ser o mais utilizado na monitorização da precipitação.

Udógrafo de báscula

O udógrafo de báscula é dos equipamentos mais utilizados para a medição da intensidade da precipitação. O princípio de funcionamento baseia-se no seguinte: um recetáculo, dividido em dois compartimentos, é mantido em equilíbrio instável segundo um eixo horizontal. Quando

a precipitação passa pelo funil, esta cai no recetáculo mais elevado. Depois de uma certa quantidade de água, por exemplo 0.2 mm (dependendo da resolução do aparelho), o recipiente fica instável e inclina-se para a outra posição de apoio. O formato dos recetáculos permite que a água possa escorrer do compartimento inferior enquanto a precipitação continua a cair no recetáculo superior [67]. A Figura 2.14 representa um udógrafo de báscula assim como o seu mecanismo.

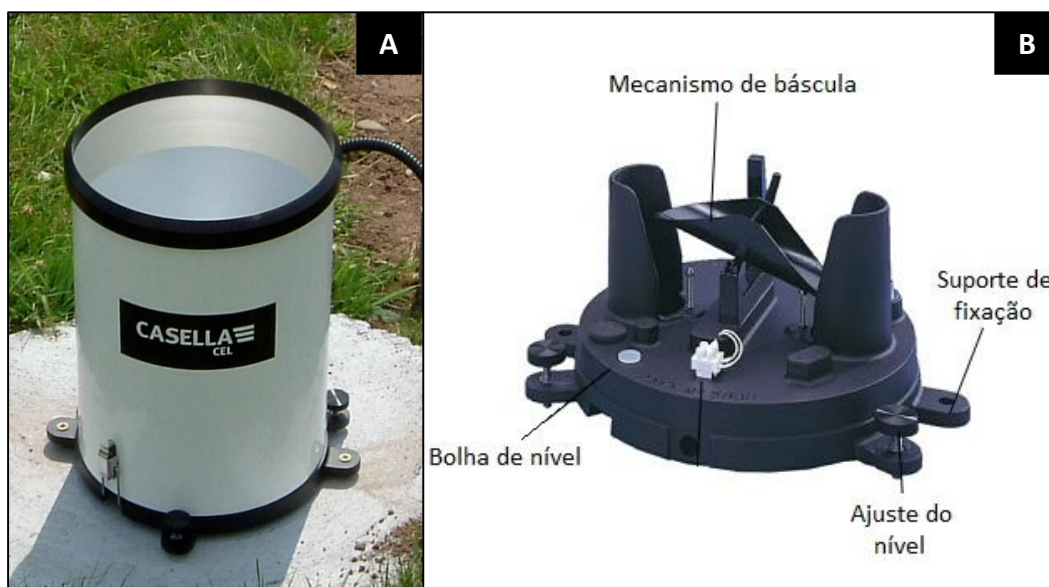


Figura 2.14 - Udógrafo de báscula (A) e respetivo mecanismo (B), adaptado de [16].

De cada vez que é realizado um basculamento, é registado um pulso pelo sistema de aquisição de dados que, posteriormente, num período de tempo pré-estabelecido reporta esta informação para a central de monitorização. Imagine-se um udógrafo de báscula com resolução de 0.2 mm onde foram registados 100 pulsos em 10 min. Isto significa que em 10 min registou-se uma precipitação naquele udógrafo de 20 mm.

Os udógrafos de báscula precisam de ser calibrados periodicamente através da medição do número de basculamentos associados a uma quantidade específica de água introduzida lentamente no aparelho, onde a água deve ser introduzida a uma taxa comparável com a da precipitação de interesse. Esta calibração deve ser realizada no campo, com o equipamento operacional, a cada 6 meses.

Estes equipamentos são mais fiáveis para intensidades de precipitação baixas a moderadas, pois para precipitação significativa esta pode não ser considerada durante o intervalo de tempo em que a báscula demora a mudar a sua posição e antes que a outra báscula já esteja

posicionada para receber a água. Precipitações intensas também tendem a manter as básculas em posições intermédias, ou seja, a precipitação é tal que impede que a água se acumule numa das básculas e esta entorne. Por esta razão é recomendado que se coloque um udómetro adjacente para posterior comparação de valores e calibração. No entanto, este erro pode ser controlado através da introdução de um sifão no funil para direccionar a água para as básculas a uma taxa controlada.

Vantagens

- Baixo custo de manutenção: como não acumulam precipitação não requerem visitas regulares para os esvaziar;
- Medições geralmente exatas, sem grandes desvios em situações de precipitações menos intensas;
- Melhor resolução temporal, em comparação com os udómetros, sendo também possível reduzir as perdas por evaporação.

Desvantagens

- Durante precipitações intensas, o udógrafo não consegue acompanhar o ritmo devido ao tempo que cada báscula demora a mudar a sua posição, provocando assim uma subestimação da precipitação real;
- A precisão do aparelho pode ficar condicionada à acumulação de pó ou sujidade nas básculas [64], bem como devido a ninhos de animais;
- Podem ocorrer perdas por evaporação em regiões quentes, tornando este erro significativo com chuva fraca;
- Não é possível determinar com precisão o momento de início e de fim de chuva muito fraca ou chuvisco [42];
- Em situações de vento muito forte, este pode entrar por entre as frestas do equipamento e provocar oscilações nas básculas de modo a que estes façam um registo de precipitação erróneo, resultando numa sobreestimação.

Existem várias empresas especializadas nestes equipamentos, destacando-se a *R. M. Young Company*, a *Casella*, a *Campbell Scientific* e a *Omega*.

2.1.1.4.3. ERROS ASSOCIADOS AOS APARELHOS

Nesta subsecção será importante referir os erros associados ao registo e medição da precipitação, algo normal em qualquer equipamento. É também de mencionar que a quantidade de precipitação medida pelos aparelhos é cerca de 30 % ou mais inferior à precipitação que realmente cai e que chega ao solo. Os erros posteriormente descritos aplicam-se quer a udógrafos quer a udómetros.

Os erros associados à precipitação podem ser divididos em sistemáticos e aleatórios. Os erros sistemáticos geralmente estão relacionados com um problema que persiste com o passar do tempo, *vide* Figura 2.16. O principal erro sistemático associado à medição da precipitação prende-se com o vento. A presença do aparelho provoca uma perturbação nas correntes horizontais e verticais do vento, sendo o ar desviado do orifício, provocando uma aceleração sobre este. Assim, a precipitação que entra no aparelho é efetivamente menor àquela que incide sobre este. Contudo, não é apenas o vento que influencia o registo da precipitação. Outros erros sistemáticos estão associados a [44],[67]:

- Perda de humidade nas paredes internas do coletor;
- Perda de humidade do recipiente quando este é esvaziado;
- Evaporação do recipiente;
- Salpicar da água;
- Má graduação da proveta em relação à seção de entrada de água no udómetro;
- Crescimento de vegetação à volta do equipamento.

Para ilustrar o efeito do vento na captação da precipitação segue-se a Figura 2.15, onde as linhas a cheio representam as correntes de ar e as linhas a tracejado retratam a trajetória das partículas de água. É no primeiro equipamento, Figura 2.15a), que se verifica a maior deformação da corrente de ar sobre o orifício, enquanto o último, Figura 2.15c) representa a menor. Consequentemente, o erro induzido pelo vento na quantificação da precipitação será maior para o primeiro aparelho.

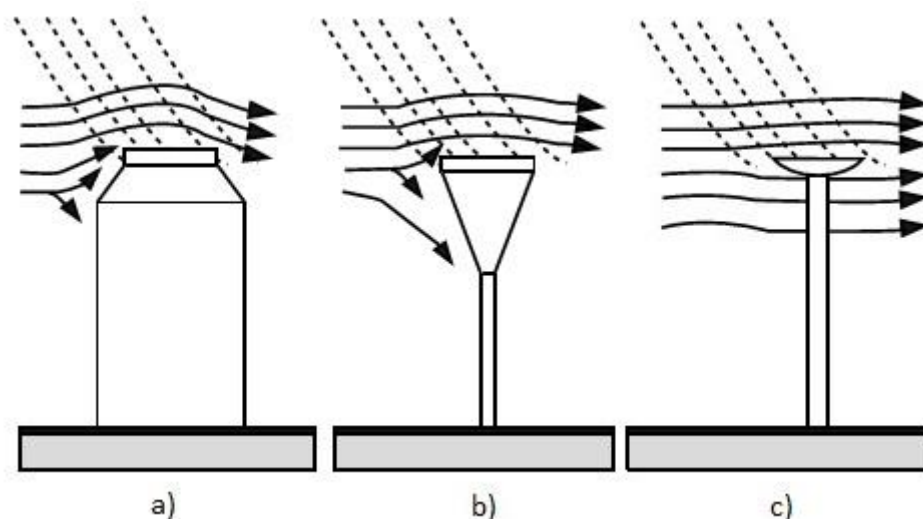


Figura 2.15 - Influência do vento na captação da precipitação, dependendo do tipo de equipamento: a) maior influência b) influência intermédia e c) menor influência, adaptado de [67].

Quanto aos erros aleatórios, são aqueles que apresentam apenas uma discrepância pontual e não se prolongam com o passar do tempo. Devem-se a [44],[67]:

- Erros por parte do observador;
- Perda de água para dentro ou para fora do aparelho;
- Deformação ou destruição do aparelho;
- Erro pontual de leitura;
- Paragem do registador;
- Obstrução por pequenos animais;
- Ocorrência de aguaceiro que apenas afetou a estação que se está a verificar.

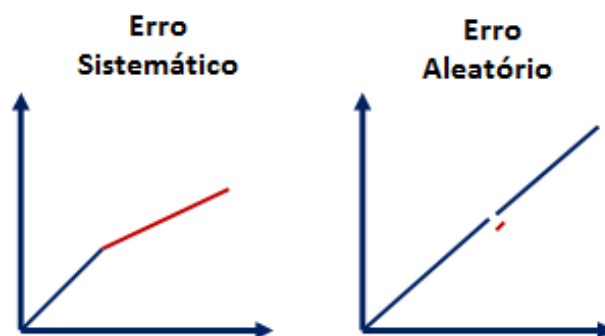


Figura 2.16 - Erro sistemático e aleatório, adaptado de [44].

2.1.1.4.4. SENSOR DE PRECIPITAÇÃO A LASER

O sensor de precipitação a laser é das tecnologias mais recentes em termos de monitorização da precipitação. Baseado no princípio de medição a laser, garante uma medição fidedigna e precisa de todos os tipos de precipitação. É capaz de medir a quantidade e intensidade de precipitação, o tamanho das gotas de água ou de outras partículas e a velocidade de queda da precipitação. Tem a capacidade de detetar e diferenciar os diferentes tipos de precipitação (chuveiro, chuva, granizo, neve).

Método de funcionamento

Um laser-díodo produz um feixe de luz infravermelho com uma determinada espessura e área de deteção (varia de aparelho para aparelho). Quando uma partícula de precipitação atravessa o feixe de luz o sinal recetor é reduzido. O diâmetro da partícula é calculado a partir da amplitude da redução, estando a velocidade de queda da partícula relacionada com a duração do sinal reduzido. É exemplificado na Figura 2.17 dois sensores de precipitação da Thies: o da esquerda é uma versão mais antiga e a frontal é a versão mais recente. Esta última tem os braços desnivelados de maneira a evitar salpicos de água para o volume a medir como também inclui duas pequenas placas nas cabeças do sensor com a mesma função.



Figura 2.17 - Sensor de precipitação a laser da Thies. O sensor da esquerda é uma versão mais antiga e o frontal é a versão mais recente [15].

O tipo de precipitação é então determinado através de dados estatísticos referentes ao diâmetro e velocidade de queda dos diferentes tipos de partículas. Como complemento é

adicionada a temperatura de modo a melhorar a identificação: ao ocorrer precipitação com temperaturas acima dos 9°C estas são automaticamente aceites como líquidas (exceto granizo), enquanto com temperatura inferior a -4°C são sólidas. No intervalo de temperatura intermédio, entre os -4 e os 9°C, todos os tipos de precipitação podem ocorrer.

Vantagens

- Preciso e requer pouca manutenção;
- Apenas os vidros do sensor deverão ser limpos, se necessário;
- Por ser um sistema de medição que não está em contacto direto com a precipitação não existem problemas semelhantes aos dos udógrafos, como as perdas por evaporação e retenção de precipitação no funil;
- A capacidade de deteção de precipitação é sensível a precipitações menos intensas, cerca de 0.001 mm/h, e pode servir como complemento aos udógrafos neste tipo de precipitações.

Desvantagens

- Complexo e caro;
- A influência de vento é uma potencial fonte de erro na medição dos diâmetros das partículas;
- A deteção de gotas simultâneas é um problema principalmente durante precipitações intensas;
- É necessário ter em conta a orientação do aparelho: com vento pouco intenso a orientação do aparelho é irrelevante mas logo que a velocidade aumenta maiores são as perdas de precipitação [66].

Entre as empresas especializadas neste tipo de equipamentos destacam-se a *Thies Clima* e a *OTT Hydromet*.

2.1.1.5. CÂMARA DE VÍDEO

As câmaras de vídeo são dos equipamentos mais utilizados em sistemas de monitorização. A sua utilização tem como função a deteção da ocorrência das aluviões [6], assim como também permitem calcular a velocidade superficial dos detritos [4].

Devido à presença de pedregulhos e outros fragmentos presentes no corpo de um fluxo de detritos, conjuntamente com a dificuldade em prever a magnitude e ocorrência destes eventos, não é possível a utilização de técnicas e aparelhos de medição de velocidade utilizados em canais de água limpa e pouco turbulenta. Assim, a utilização de uma câmara surge como solução ao problema da medição da velocidade superficial das aluviões [5].

Arattano e Marchi [5] realizaram uma análise a diversas aluviões ocorridas na Torrente de Moscardo, localizada nos Alpes Italianos. Foram utilizados diversos equipamentos de monitorização, entre eles sensores ultrassónicos e câmaras de vídeo, tendo os autores procedido a uma comparação entre as medições de velocidade obtidas por estes equipamentos. Estes, os autores, chegaram à conclusão que os resultados obtidos eram muito semelhantes e que as discrepâncias existentes podiam ser atribuídas a aproximações nos métodos de medição e aos diferentes comprimentos de cada secção do canal considerados. A Tabela 2.3 representa a comparação das medições de velocidade obtidas pelos sensores ultrassónicos e pelo processamento das imagens de vídeo, efetuada pelos autores.

Tabela 2.3 - Comparação entre os valores de velocidade obtidos pelos sensores ultrassónicos e pelas câmaras de vídeo, adaptado de [5].

Aluviões	Sensores ultrassónicos [m/s]	Processamento das imagens [m/s]
A	4.7	4.3
B	7.4	7.0
C	7.5	7.2
D	7.9	7.5
E	5.1	4.8
A: 22 junho 1996 – onda precursora; B: 22 junho 1996 – 1ª onda secundária; C: 22 junho 1996 – 2ª onda secundária; D: 8 julho 1996 – onda precursora; E: 8 julho 1996 – onda secundária.		

A tecnologia mais recente já permite a transmissão das imagens, através de uma rede de banda larga, para uma estação de monitorização e realizar o processamento em tempo real. Quando ocorre uma aluvião o sistema é capaz de automaticamente reconhecer a iniciação do evento e emitir um sinal de alerta.

Vantagens

- É um equipamento que não necessita de estar em contacto com a aluvião, logo dificilmente será prejudicada pela turbulência da corrente;
- Instalação segura: a câmara pode ser colocada nas laterais do canal [6].

Desvantagens

- A presença de nevoeiro pode dificultar a captação de imagens;
- A ocorrência de uma aluvião à noite poderá não ser registada pela câmara [6].

2.1.1.6. SENSOR DE MEDIÇÃO DO TEOR EM ÁGUA DO SOLO

Muitas aluviões têm como fator de iniciação a ocorrência de movimentos de terras. Estes deslizamentos, por sua vez, têm como base condições hidrológicas desfavoráveis, como precipitações intensas de curta duração ou precipitações moderadas de longa duração. Visto que muitos solos atingem a rotura por saturação é necessária uma monitorização constante do teor em água dos terrenos durante este tipo de eventos. Para este efeito, é comum em sistemas de monitorização a utilização de sensores de medição da humidade do solo como o representado na Figura 2.18.

O sensor determina o teor em água no espaço imediatamente adjacente às pontas através da medição da constante dielétrica do solo. A constante dielétrica da água ($K \approx 81$ a 20°C) é mais elevada em comparação com a do ar ($K=1$) ou dos minerais do solo ($K=2-5$). Geralmente, valores entre 0 e $0.1 \text{ m}^3/\text{m}^3$ são indicadores de solo seco em estufa e solo seco, respetivamente, enquanto valores iguais ou superiores a $0.3 \text{ m}^3/\text{m}^3$ indicam solo húmido a saturado [41].



Figura 2.18 - Sensor de humidade do solo. Modelo Decagon 10HS [19].

Cada sensor é capaz de apenas fazer medições do teor de água no local onde estão colocados. Como o teor em água varia consideravelmente em pequenas áreas, é necessária a utilização de mais que um sensor para que se possam obter leituras rigorosas e fiáveis. Espaços vazios no solo, ou solo excessivamente compacto em redor às pontas podem influenciar profundamente as leituras do teor em água. É necessário um cuidado especial ao introduzir o sensor em solos densos pois as pontas podem partir se for exercida uma força excessiva.

O sensor não deve ser colocado perto de objetos metálicos, como postes, pois estes poderão influenciar o campo eletromagnético e afetar negativamente as leituras. Este deverá ser colocado a uma determinada profundidade de maneira a obter registos precisos e fidedignos. É necessário ter em conta as variações de temperatura do solo pois estes equipamentos são sensíveis a tais variações, uma vez que a constante dielétrica da água também varia com a temperatura.

Este tipo de sensor pode ser ligado a um *data logger*, sendo apenas necessária a deslocação de um técnico ao local para efeitos de manutenção.

Vantagens

- Não requer cuidados especiais em termos de manutenção.

Desvantagens

- Sensíveis a variações de temperatura;
- Área de influência limitada, sendo, por isso, necessária a utilização de mais que um sensor.

Entre as empresas responsáveis enumeram-se a *Delta-T Devices* e a *Campbell Scientific*.

2.1.1.7. SENSORES DE FIO

São um tipo de sensores utilizados, geralmente, para detetar a chegada de uma aluvião. São compostos por fios metálicos eletrificados, ou por fibra ótica, colocados de um lado a outro de uma secção, *vide* Figura 2.19, a diferentes alturas e estão em contacto com o fluxo. Os fios são colocados a diferentes níveis de modo a que a altura de escoamento da enxurrada possa ser avaliada de acordo com o nível do fio partido [35], [61]. Quando um fio é cortado deixa de haver transmissão de corrente, pelo que um dispositivo de controlo regista a ocorrência.

Através deste equipamento é possível determinar a altura máxima do escoamento e calcular a velocidade média da frente da onda pelo mesmo método referido para os sensores ultrassónicos.

Vantagens

- Equipamento simples e barato.

Desvantagens

- Tornam-se inutilizáveis assim que os fios rebentam, sendo necessária a sua substituição;
- Risco de falsos alarmes devido à passagem de, por exemplo, troncos de árvores.

Destaca-se a *Takuwa Corporation* como entidade representadora deste tipo de equipamento de deteção.

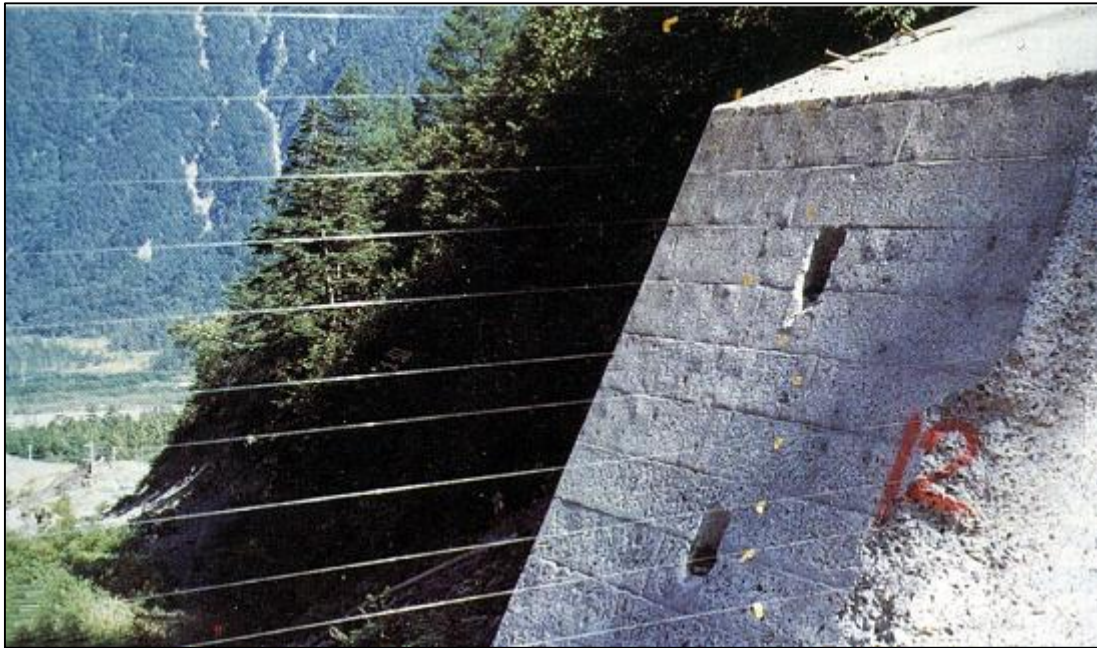


Figura 2.19 - Sensores de fio [11].

2.2. SISTEMAS DE MONITORIZAÇÃO EXISTENTES

Em várias regiões montanhosas do mundo há registos de enxurradas que ameaçam pessoas e infraestruturas com as suas forças destrutivas, pelo que foram criados sistemas de instrumentação e de monitorização como medida de estudo, controlo e mitigação da sua perigosidade, assim como também sistemas de alerta. Enquanto a monitorização visa estudar o comportamento da aluvião, a instrumentação procura detetar a ocorrência destes eventos de maneira a servir de alerta para aqueles expostos ao risco [1]. Estabelecer um sistema de alerta que possa ser ativado logo nos momentos iniciais de uma aluvião é crucial para a proteção das populações e infraestruturas a jusante. Segundo Gianora *et al.* [22], três princípios devem ser cumpridos para que um sistema de alerta seja eficaz e por sua vez, fiável:

- Elevado grau de redundância, conseguido através da utilização de um sistema duplo de geofones e de estação de controlo;
- Elevado grau de autodiagnóstico, através de um controlo automático que verifica o correto funcionamento do sistema;
- Baixa taxa de falsos alarmes, por evitar a ativação do alarme quando não estão satisfeitas as condições para a existência de aluviões.

Assim, diversos locais, um pouco por todo o lado, com certas características favoráveis à ocorrência de enxurradas foram instrumentados e monitorizados. Entre eles destacam-se a China, Japão, Itália, Suíça, Espanha, Taiwan ou Estados Unidos da América (EUA).

Em seguida serão descritos alguns locais e respetivos sistemas de monitorização. Serão abordados a Torrente de Moscardo e Acquabona, em Itália, Taiwan e Califórnia, nos EUA. Muitos mais locais haveria para descrever, no entanto estes foram selecionados devido aos equipamentos utilizados e devido a algumas particularidades no sistema de monitorização, como a utilização de um sistema móvel, em Taiwan.

2.2.1. TORRENTE DE MOSCARDO, ITÁLIA

LOCALIZAÇÃO E CARATERÍSTICAS DA BACIA

A bacia hidrográfica da torrente de Moscardo está localizada nos Alpes Cárnicos, na zona nordeste de Itália, cobrindo uma área de 4.1 km², com uma elevação compreendida entre os 890 e 2043 m e um declive médio de 63 %. A Figura 2.20 ilustra a delimitação da bacia da Torrente de Moscardo, assim como a zona de iniciação das aluviões e os locais instrumentados.

SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO

A meados dos anos 80 foi iniciado um projeto de investigação pelo Instituto para a Proteção Hidrológica e Geológica do Concelho Nacional Italiano de Pesquisa de Torino, em inglês, *Institute for Hydrological and Geological Protection of the Italian National Research Council* (CNR IRPI), cujo objetivo era o dimensionamento e a instalação de um sistema de monitorização num pequeno curso de água nos Alpes Italianos. A zona escolhida foi a Torrente de Moscardo por apresentar uma elevada taxa de fluxos de detritos, anormalmente alta para os Alpes Europeus, mas baixa quando comparada com algumas bacias asiáticas. Em 1989 o local foi equipado para a monitorização de enxurradas.

Esta bacia foi selecionada para monitorização pois, para além de apresentar uma elevada taxa de ocorrência de aluviões, é de fácil acesso e com disponibilidade de energia elétrica e apresenta um canal bem definido, não estando sujeita a grandes modificações ou desvios.

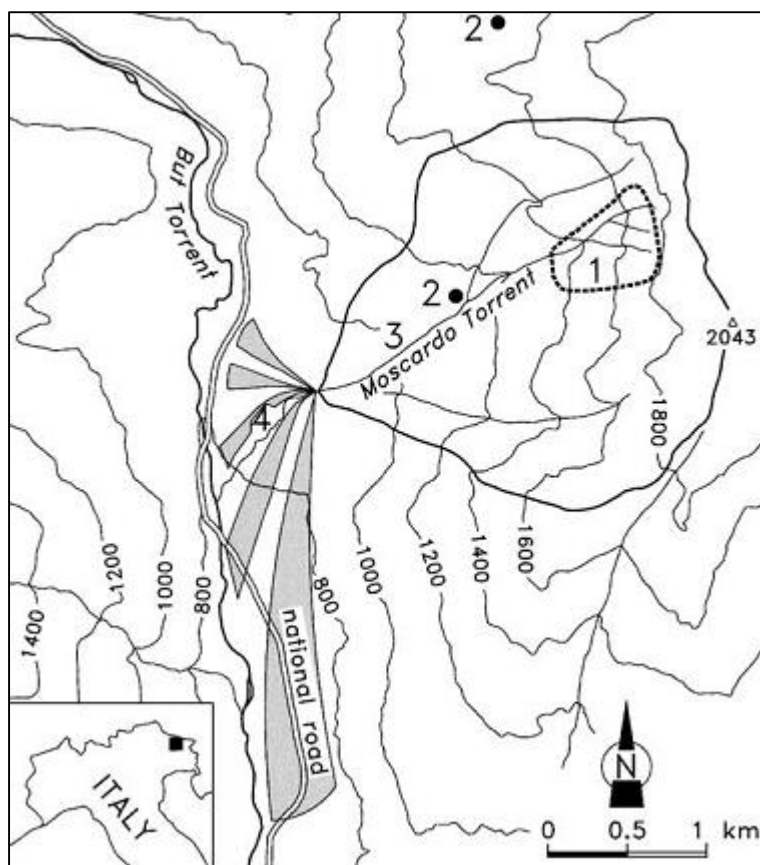


Figura 2.20 - Torrente de Moscardo. 1: zona de iniciação das aluviões; 2: udómetros; 3 e 4: trechos instrumentados [38].

Assim, em 1989 foi instalado o sistema de monitorização composto por dois sensores ultrassónicos e um udógrafo. Os sensores ultrassónicos foram colocados numa zona intermédia do canal, com uma distância de 300 m entre eles, assentes em estruturas de betão localizadas nas margens do canal. O udógrafo foi colocado a uma elevação de 1520 m, perto do limite da bacia.

Em 1995 o sistema foi complementado com um terceiro sensor ultrassónico, colocado a 150 m a montante dos outros dois existentes, no entanto estes passaram a ser suspensos por cima do canal, deixando de parte as estruturas em betão, pois uma aluvião em 1993 causou um alargamento da seção transversal e provocou um desvio do canal para o lado direito. O problema resultante é que o sensor, que estava assente na margem esquerda, deixou de

monitorizar a parte central do canal e a estrutura em que este estava assente não podia ser facilmente modificada [17].

Para além da introdução de um novo sensor ultrassónico, foi também instalada uma câmara de vídeo no percurso monitorizado pelos sensores ultrassónicos, perto do sensor intermédio, e uma rede de sensores sísmicos (sismómetros e geofones) a cerca de 1 km a montante das estações ultrassónicas. É de salientar que a câmara de vídeo apenas regista quando um *software* deteta mudanças abruptas nos valores registados pelo sensor ultrassónico a montante.

Em 1997, um segundo udógrafo é colocado no centro da bacia e dois novos sensores sísmicos são instalados perto do sensor ultrassónico intermédio (*vide* Figura 2.21).

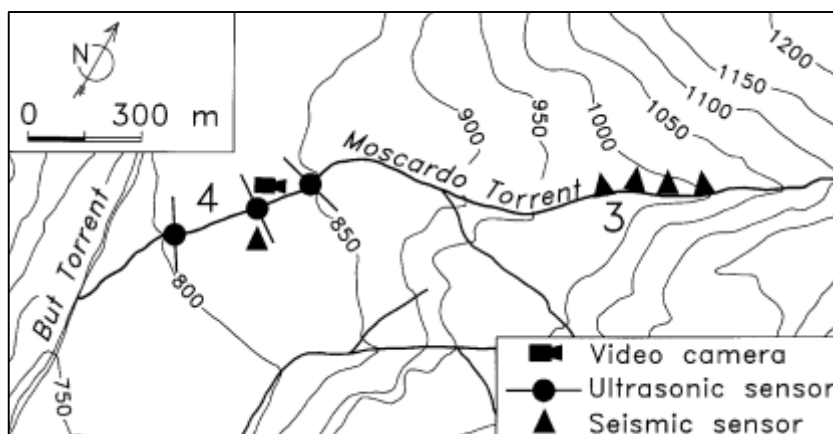


Figura 2.21 - Localização das seções instrumentadas [38].

Devido a contenção de custos ao longo dos anos, em 2006 o sistema de monitorização estava equipado com um udógrafo colocado na parte central da bacia; a rede de sensores sísmicos era constituída por dois geofones e um sismómetro, colocados na margem direita do canal, em que a distância entre o primeiro e o segundo sensor era de 88 m e entre o segundo e o terceiro de 155 m. No cone de dejeção estavam colocados dois sensores ultrassónicos, afastados entre si a 75 m, e um geofone colocado 63 m a jusante do segundo sensor ultrassónico [9].

PARÂMETROS MEDIDOS

Ao longo do tempo foram vários os parâmetros medidos e registados pelos equipamentos existentes em Moscardo. Incluem-se entre estes a velocidade média da frente, velocidade superficial, volume, altura da torrente, precipitações que desencadeiam aluviões, entre outros [10].

Através dos sensores ultrassónicos foi possível determinar a altura da torrente e assim registar os gráficos do perfil de escoamento das aluviões. Inicialmente, o tempo entre duas medições consecutivas era de 60 s, mas devido a atualizações e melhoramentos dos sensores, os registos passaram a ser efetuados de 1 em 1 s. A velocidade média da frente é também calculada com recurso aos ultrassónicos. Através da medição da altura da torrente e de levantamentos topográficos foi possível estimar o pico de descarga e o volume total de fluxo de detritos.

Os sensores sísmicos, geofones e sismómetros, registam as vibrações do solo produzidas pela passagem de uma aluvião. Inicialmente estes foram colocados com o propósito de verificar que informação poderia ser obtida através destes aparelhos com a passagem de uma aluvião, mas os resultados obtidos mostraram a possibilidade de usar estes detetores como equipamentos de medição da velocidade.

A câmara de vídeo permite a interpretação visual das características das aluviões. Esta é acionada pelo sensor ultrassónico a montante, através de um *software* que identifica mudanças bruscas na torrente. A câmara está colocada de maneira a poder filmar obliquamente uma secção do canal com cerca de 80 m. Para além da interpretação visual, foi também possível estimar a velocidade superficial das aluviões. Os resultados obtidos do processamento das imagens mostraram-se consistentes com aqueles obtidos pelos sensores ultrassónicos.

Os equipamentos instalados em Moscardo (udógrafos e sensores que detetam a passagem das aluviões) permitiram analisar com melhor precisão as relações entre as características das tempestades e a ocorrência de aluviões. Foram analisados registos de precipitação entre 1990 e 1998 e comparadas as características de tempestades de duas classes: tempestades que originaram aluviões e tempestades que não originaram aluviões. Foram analisadas a quantidade total de precipitação, intensidade média, intensidade máxima de 60 min e

precipitação antecedente. A análise da precipitação demonstrou que as características das tempestades e a precipitação antecedente têm um papel importante mas não são suficientes para definir as condições iniciais de formação das aluviões. É necessária uma combinação de disponibilidade de sedimentos e condições hidrológicas para a formação do evento.

2.2.2. TAIWAN

LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DA BACIA

Taiwan é uma ilha propensa à ocorrência de aluviões, provocando estas muitas vezes perdas humanas e prejuízos em propriedades. Apesar da ocorrência relativamente comum destes fenómenos, a investigação era escassa, e os dados registados eram poucos, pelo que o Gabinete de Conservação do Solo e da Água, em inglês, *Soil and Water Conservation Bureau* (SWCB), iniciou o projeto de monitorização.

A ilha de Taiwan está localizada na fronteira entre as Placas Euroasiática e das Filipinas, estando por isso sujeita à ocorrência de sismos com alguma frequência. Uma frente estacionária persistente entre a primavera e o verão e a ocorrência de tufões maioritariamente entre o verão e o outono são os responsáveis pelas fortes precipitações que abalam a ilha, onde a precipitação anual média é superior a 2500 mm.

As montanhas são altas e íngremes, a orografia e as elevações são altamente variáveis; as planícies são estreitas e ocupam somente um terço da ilha, sendo que é nestas zonas onde existe maior densidade populacional. Estas condições juntamente com as precipitações intensas e com os sismos tornam a ilha de Taiwan suscetível à ocorrência de aluviões.

SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO FIXO

Desde 2002 que em Taiwan funciona o projeto de monitorização de aluviões [68]. Este é constituído por 22 estações de monitorização fixas (*in situ*) e 3 estações móveis, estabelecidas por vários locais de Taiwan, *vide* Figura 2.22.

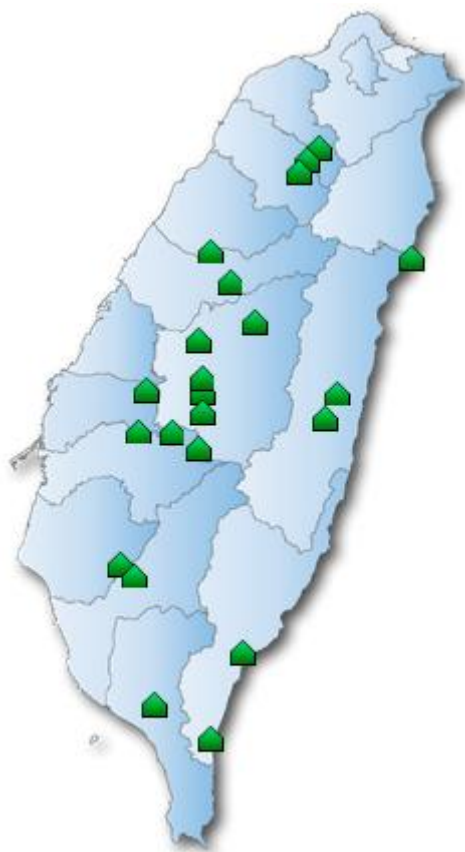


Figura 2.22 - Distribuição das 22 estações de monitorização “on site” em Taiwan.

As 22 estações de monitorização encontram-se localizadas nas proximidades de locais propensos a aluviões. De acordo com um estudo realizado pelo SWCB, existem em Taiwan 1552 potenciais canais onde se podem desenvolver fluxos de detritos.

Em cada estação de monitorização estão presentes como equipamentos para deteção das aluviões: udógrafos, câmaras de vídeo, sensores de fio, geofones e um sensor ultrassónico. Para registar os efeitos do clima existem ainda sensores de medição de humidade e temperatura do ar, anemómetros, cataventos, sensores de medição do teor em água do solo e barómetros.

Os dados registados pelos sensores são transmitidos para uma cabine de instrumentação através de cabos ou de um sistema *wireless*, para um processamento de dados inicial. Após este processamento, os dados são transmitidos via satélite para o SWCB. Caso ocorra alguma falha de transmissão por satélite, existem sistemas *backup* de envio da informação, através de um *modem* com ligação ADSL ou através da rede de telecomunicações móvel ou doméstica. A transmissão por satélite foi escolhida como principal sistema de comunicação devido ao clima e à dificuldade de comunicação existente nas zonas montanhosas remotas.

O sistema de monitorização funciona segundo dois modos: o “modo normal” e o “modo de evento”. Durante o “modo normal” a taxa de aquisição de dados por parte dos sensores funciona a baixa frequência. Quando os udógrafos detetam precipitação que ultrapassa os limites definidos (a intensidade de precipitação ultrapassa os 10 mm/h ou a precipitação acumulada excede os 100 mm em 24 horas) o sistema passa a “modo de evento”, e a taxa de aquisição de dados dos sensores é maior. Ao mesmo tempo, o sistema emite automaticamente um sinal para os investigadores da SWCB através de telecomunicações móveis.

SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO MÓVEL

A maior parte das aluviões em Taiwan acontece durante a época de cheia (maio a novembro), com origem em tufões acompanhados por precipitações intensas. Uma vez que a rota dos tufões é variável, nem sempre os eventos acontecem nos locais que são monitorizados, daí o SWCB ter desenvolvido desde 2004 diversas estações de monitorização móveis, como aquela representada na Figura 2.23, de modo acompanhar a imprevisibilidade do fenómeno.

Quando o Instituto de Meteorologia de Taiwan emite um alerta de tufão, as estações móveis são encaminhadas para os locais com maior probabilidade de ocorrência de aluvião, de acordo com um modelo de previsão da rota dos tufões. Em 2013 existiam três estações de monitorização móveis [34].



Figura 2.23 - Estação de monitorização móvel de aluviões [68].

As estações móveis são semelhantes às aquelas colocadas *in situ*. Incluem sensores de monitorização, plataforma de instrumentação a bordo, sistema de transmissão e de visualização dos dados. O sistema de monitorização contém um udógrafo, um geofone e duas câmaras de vídeo. A plataforma de instrumentação inclui computadores e dispositivos de alimentação mais leves e instrumentos à prova de choque com dimensões mais reduzidas. A transmissão dos dados é, à semelhança da estação fixa, realizada por satélite.

2.2.3. ACQUABONA, ITÁLIA

LOCALIZAÇÃO E CARATERÍSTICAS DA BACIA

O curso de água de Acquabona, nos Alpes Orientais Italianos, *vide* Figura 2.24, foi selecionado como local de observação e experimentação para implementação de um sistema de monitorização devido à frequência de ocorrência de aluviões (quase anual) e também devido à geomorfologia e condições hidrológicas do local que são semelhantes a outros sítios onde ocorreram aluviões.

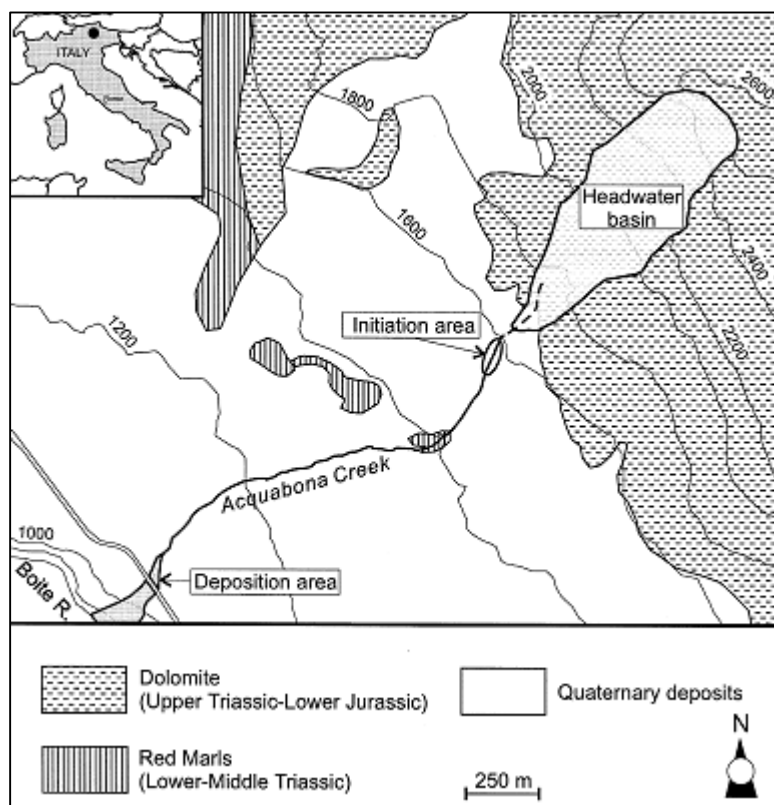


Figura 2.24 - Localização da bacia de Acquabona [14].

O sistema tinha como objetivo identificar as condições hidrológicas que estavam na origem de aluviões, bem como a investigação dos mecanismos que acionavam fluxos de detritos, propriedades dinâmicas e processos de deposição dos fluxos de detritos [14].

A bacia hidrográfica de Acquabona é constituída por uma bacia superior formada por rochas dolomíticas do Triássico Superior e do Jurássico inferior e rochas calcárias, responsáveis pela acumulação de detritos grosseiros e de pedregulhos nas encostas e no canal. Tem uma área de drenagem de 0.3 km², com uma elevação máxima de 2667 m e um declive médio de 43°. Na bacia inferior estas rochas conjuntamente com margas vermelhas estão cobertas por espessos depósitos de seixos, depósitos aluvionares e depósitos de fluxos de detritos constituídos por pedregulhos até 3-4 m de diâmetro.

O canal tem sido “cortado” por aluviões até uma profundidade de 30 m. Este tem um declive médio de 18°, em que a zona de iniciação tem uma inclinação de 30° e a zona de deposição 7°. Na Tabela 2.4 estão identificadas as principais características morfométricas da bacia de Acquabona.

As condições climáticas são típicas dos ambientes alpinos. A precipitação anual varia entre 900 e 1500 mm. Menos de 20% da precipitação anual ocorre como neve de novembro a maio; no verão e outono são comuns tempestades intensas e localizadas.

Tabela 2.4 - Características morfométricas da bacia de Acquabona, adaptado de [14].

Área da bacia superior [km ²]	0.30
Elevação máxima [m a.s.l.]	2667
Comprimento do canal [m]	1632
Inclinação média do canal [°]	18
Inclinação do canal na zona de iniciação [°]	30
Inclinação do canal na zona de deposição [°]	7

SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO

O sistema de monitorização de Acquabona sofreu alterações ao longo dos anos [53]. O primeiro sistema foi implementado em 1997, e era composto por 3 estações no local da

monitorização e uma fora deste, responsável pela aquisição dos dados provenientes das outras estações. O segundo sistema surgiu em 2000, sendo composto pelo mesmo número de estações, mas com diferentes localizações. Em 2009 foi instalado o terceiro sistema de monitorização, mas desta vez com menos uma estação e algumas alterações relativas a equipamentos, descritos posteriormente.

Apesar das transformações ocorridas, as características do sistema mantiveram-se: tamanho reduzido e baixo consumo de energia; capacidade de alertar a ocorrência de uma aluvião através de uma rede telemétrica; dois diferentes modos de aquisição de dados (“modo normal” e “modo de evento”); realização contínua de medições; não requer um grande nível de manutenção.

O 1º sistema de monitorização, 1997

O primeiro sistema de monitorização foi criado em finais dos anos 90, em colaboração com o USGS – *Cascades Volcano Observatory*, sendo composto por três estações de monitorização *in situ*, assim como apresentado na Figura 2.25, e uma estação adjacente ao local monitorizado, permitindo a transferência remota dos dados.

A primeira estação de monitorização estava localizada na zona de iniciação dos fluxos de detritos, a uma altitude de cerca de 1565 m a.s.l. e era constituída por um udógrafo de báscula, um geofone, cinco sensores de pressão cujo objetivo era detetar níveis de água que pudessem contribuir para o processo de iniciação (quatro sensores superficiais) e a medição da pressão intersticial (um sensor em profundidade), e duas câmaras de vídeo.

A segunda estação de monitorização estava localizada na zona de transporte, a cerca de 1310 m a.s.l., estando equipada com três geofones, separados entre si cerca de 100 m, e um anemómetro para medição da velocidade do vento.

A terceira estação, no fim da zona de transporte, a uma altitude de 1175 m a.s.l., estava instrumentada com três geofones, igualmente separados entre si por 100 m, um sensor ultrassónico e uma câmara de vídeo suspensos sobre o canal permitiam informação detalhada acerca da altura do fluxo e da respetiva velocidade superficial, um sistema de medição da pressão total e um sensor de pressão da água, ambos instalados no leito do canal.

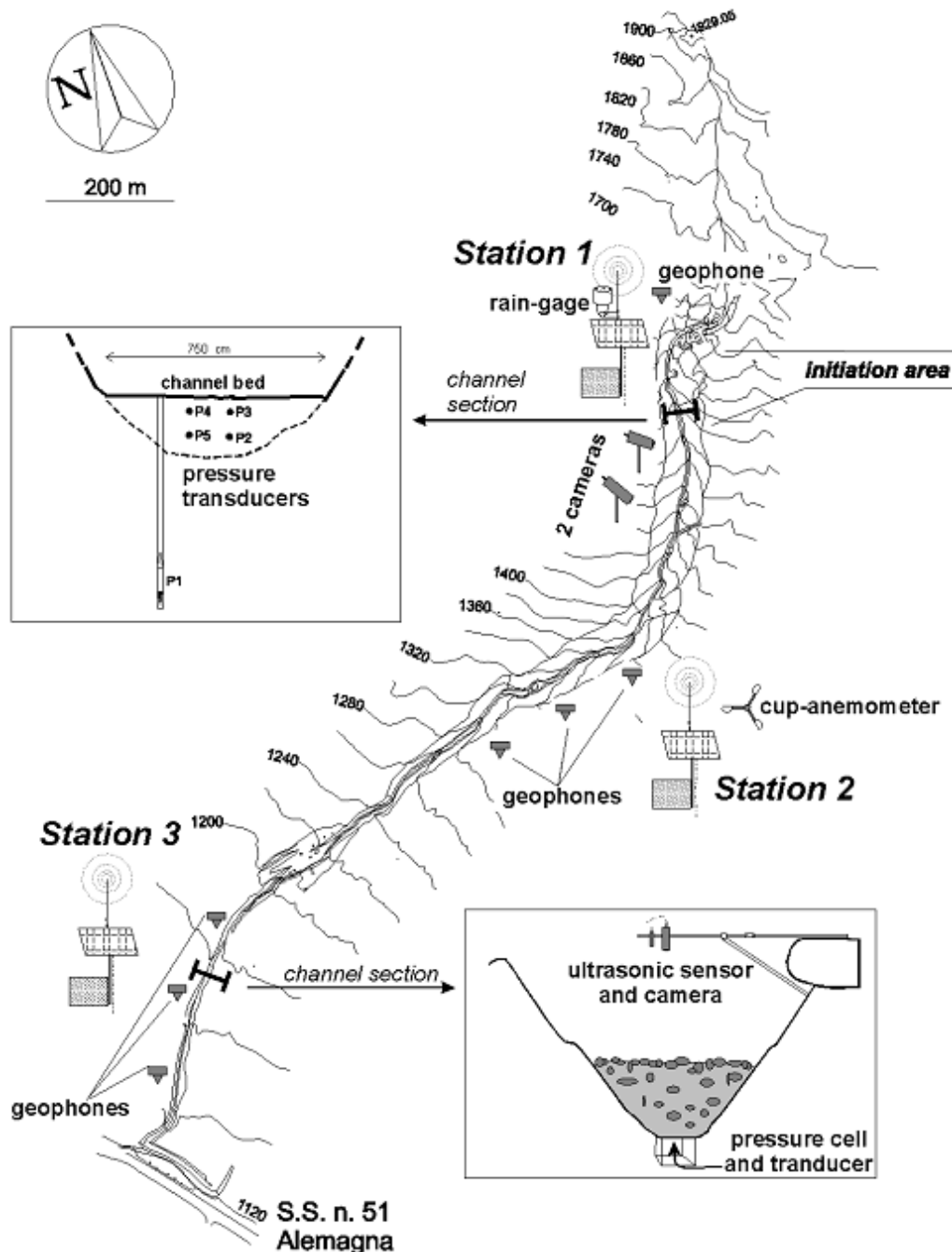


Figura 2.25 - Sistema de monitorização de Acquabona, em 1997 [11].

Cada estação era alimentada por uma bateria de 12 V carregada por um painel solar e estava equipada com um *data logger* e um rádio recetor e transmissor. Através da ligação rádio era possível transmitir a informação recolhida pelos sensores para uma estação de recolha de dados e também controlar remotamente o correto funcionamento dos equipamentos. De maneira a reduzir a energia necessária para o funcionamento dos equipamentos, aqueles que

consumiam mais energia (sensor ultrassónico e câmaras de vídeo) apenas eram ativados no modo de evento.

Em condições normais, isto é, quando não ocorria nenhuma aluvião, os dados eram recolhidos a uma frequência baixa (0.0033 Hz, 1 aquisição a cada 5 minutos), e a 2 Hz e 5 Hz (estação 2 e estações 1-3, respetivamente) quando o sistema se encontrava em modo de evento.

O modo de evento era ativado quando o sinal emitido pelos geofones fosse superior a 50 mV e com uma duração superior a 20 s [20].

Apesar da qualidade dos dados recolhidos das estações de monitorização, o sistema demonstrou alguns aspetos menos bem conseguidos durante alguns eventos. Os geofones localizados nas estações de montante e de jusante mostraram-se eficazes como sensores para a ativação do modo de evento, no entanto, os geofones da estação intermédia (estação 2) não funcionaram com aquele objetivo, mesmo depois de se ter baixado os limites. O sistema para medição da pressão total localizado na estação de jusante foi “varrido” por uma aluvião a 27 de julho de 1998, apesar de ter “sobrevivido” a um evento ocorrido apenas dois dias antes.

O 2º sistema de monitorização, 2000

O segundo sistema de monitorização foi desenvolvido no início de 2000 em colaboração com uma empresa local responsável pelo dimensionamento e gestão do sistema de controlo dos equipamentos, tendo sido mantidas as três estações de monitorização, mas duas delas com diferentes localizações.

A primeira estação manteve-se inalterada em localização, comparativamente com o primeiro sistema de monitorização instalado em 1997. Estava igualmente equipada com um udógrafo de báscula, um geofone responsável pela ativação do sistema em caso de aluvião, quatro sensores de pressão e uma câmara de vídeo ativada pelo geofone caso este detetasse um ultrapassar do limite previamente definido.

A segunda estação estava localizada a 1175 m a.s.l, ou seja, à mesma cota em que a terceira estação de monitorização do sistema prévio se encontrava. Estava equipada com quatro geofones, um sensor ultrassónico, um sistema de medição da pressão total ancorado a uma estrutura de betão embebido no leito do canal, um piezómetro e uma câmara de vídeo.

A terceira estação de monitorização estava posicionada a uma altitude de 1120 m a.s.l., na zona da bacia designada para a contenção do volume de material sólido transportado pelas aluviões. Era constituída por um sensor ultrassónico, um sistema de medição da pressão total, um sensor de pressão da água e uma câmara de vídeo.

Assim como o primeiro sistema, este também funcionava segundo dois modos: o “modo normal” e o “modo de evento”. Durante o “modo normal” a aquisição de dados era contínua e os dados eram analisados a cada 90 s. O “modo de evento” era ativado quando o valor limite do sinal do geofone ou da intensidade de precipitação definidos para a estação 1 eram ultrapassados.

Os valores limites foram definidos tendo em conta dados relativos a monitorizações anteriores bem como em simulações realizadas com geofones e udógrafos; a escolha destes é fundamental para um registo fiável dos eventos. Assim, tendo em conta estes parâmetros, para o udógrafo foi definida uma intensidade de precipitação de 4 mm durante 10 min e para o geofone, um sinal excedente a 400 mV por mais de 10 s correspondia à ativação do sistema [62]. Em “modo de evento”, se estes valores não fossem excedidos durante mais de 30 min o sistema passava a “modo normal”.

Novamente, cada estação estava equipada com um sistema de energia local e um sistema local de aquisição de dados, com um rádio recetor e transmissor ligado a uma estação adjacente à bacia, onde um *modem* via rádio permitia a transferência remota dos dados.

O 3º sistema de monitorização, 2009

Este sistema de monitorização foi implementado pelo Departamento de Geociências da Universidade de Pádua, Itália, tendo sido redimensionado de maneira a que as novas estações fossem colocadas a maiores altitudes, de maneira a acompanhar as mudanças morfológicas que estavam a ocorrer naquele curso de água, nomeadamente uma progressiva regressão da zona de deposição do material.

Em 2011 [53] era constituído por duas estações de monitorização. A primeira, a de montante, localizada a cerca de 1715 m a.s.l., é uma estação meteorológica que recolhe dados relativos

a precipitação, velocidade e direção do vento, pressão barométrica, temperatura do ar e humidade relativa. A estação é alimentada por três painéis solares.

A estação de jusante está situada a 1185 m a.s.l., estando os equipamentos de monitorização montados numa estrutura ancorada a um pedregulho na margem esquerda do canal. Esta estrutura é constituída por um braço treliçado com cerca de 6 m de comprimento e tem dimensão suficiente para chegar à parte central da secção a ser monitorizada, *vide* Figura 2.26. O braço dista do fundo do canal cerca de 3.5 m. É na estrutura que estão colocados os equipamentos de monitorização, entre eles, um udógrafo de báscula, um sensor ultrassónico, uma câmara de vídeo digital com sistema de iluminação noturno e um sistema rádio.



Figura 2.26 - Estação de monitorização de jusante, 2009 [37].

Para além destes equipamentos foram também colocados quatro geofones, usados como meio de ativação do sistema de monitorização e também como ferramenta para determinação do tempo de passagem de uma determinada vaga por uma secção do canal. Três deles foram enterrados a montante da estação, ao longo da margem esquerda, espaçados entre si cerca de 100 m. A cerca de 100 m a jusante da estação foi colocado o quarto sensor. A estação tem ligação à rede de energia principal, sendo alimentada deste modo.

2.2.4. CALIFÓRNIA, EUA

Na Califórnia do sul, a combinação de zonas montanhosas, elevada densidade populacional e elevada frequência de fogos colocam novas áreas em risco a aluviões quase todos os anos. Na maior parte das vezes estes eventos destroem propriedades, causando, algumas vezes, fatalidades. Um aspeto particularmente perigoso das aluviões com origem em fogos é o facto de estas poderem surgir a partir de muito menores quantidades de precipitação que aquela que é necessária para zonas que não foram atingidas por incêndios.

LOCALIZAÇÃO E CARATERÍSTICAS DA BACIA

Os locais de estudo escolhidos incluíam dois diferentes conjuntos montanhosos com diferentes materiais geológicos. Quatro locais (Arroyo Seco, Dunsmore 1, Dunsmore 2 e Big Tujunga) pertenciam à Montanha de São Gabriel e um quinto local (Jesusita) estava localizado na Montanha de Santa Ynez. Os locais apresentam semelhanças nas caraterísticas topográficas, clima e vegetação antes dos incêndios. Nas bacias pertencentes à Montanha de São Gabriel o firme é formado por rochas graníticas do Cretáceo e os sedimentos são classificados como areia, enquanto em Santa Ynez estão presentes rochas sedimentares arenosas do Eoceno e sedimentos areno-siltosos [30]. Na Tabela 2.5 são identificadas algumas caraterísticas de cada bacia.

Tabela 2.5 - Caraterísticas das bacias monitorizadas.

Local	Bacia	Área da Bacia [km ²]	Percentagem de área queimada [%]	Máx/Mín Elevação [m]	Inclinação do canal [°]
Arroyo Seco	São Gabriel	0.0135	99	1040/940	22
Dunsmore 1	São Gabriel	0.475	43	1548/989	19
Dunsmore 2	São Gabriel	0.0795	66	1149/817	12
Big Tujunga	São Gabriel	1.37	97	1548/571	9
Jesusita	Santa Ynez	0.0224	100	540/429	14

SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO

Em 2009 foram instaladas cinco estações de monitorização em várias bacias hidrográficas do sul Californiano com o objetivo de verificar a hipótese que a origem das aluviões após incêndios estava diretamente relacionada com precipitações de elevada intensidade capazes de produzir escoamento superficial. Para além disto, o sistema também tinha em vista esclarecer outras questões relacionadas com a origem destes eventos como, quais as diferenças existentes entre o aparecimento, magnitude e dinâmica da enxurrada na primeira chuvada depois dos incêndios e as aluviões geradas por tempestades posteriores; tendo em conta intensidades de precipitação semelhantes, as aluviões originadas no começo de uma tempestade seriam diferentes em magnitude que aquelas originadas com o passar da tempestade, devido às diferenças no teor em água das encostas da bacia e dos sedimentos do leito do canal; e por fim, avaliar o comportamento das enxurradas tendo em conta a dimensão da bacia e o material geológico[30].

Durante várias tempestades no primeiro inverno após os incêndios, as estações de monitorização registaram medições referentes a precipitação, altura do fluxo, teor em água do solo das encostas das bacias e pressão intersticial no leito dos canais. Cada uma das estações foi colocada em secções transversais mais ou menos estáveis de modo a minimizar os erros ao estimar o caudal que passava em cada secção durante um evento. Os locais estavam equipados com udógrafos, sensores de medição do teor em água colocados nas encostas do canal, um sensor de medição do nível (laser ou ultrassónico) suspenso sobre o canal, sensores de medição da pressão intersticial e uma câmara de vídeo (Figura 2.27). No entanto, nem todas as estações foram equipadas da mesma forma. A Tabela 2.6 identifica que sensores foram utilizados em cada local de monitorização.

Tabela 2.6 - Parâmetros e sensores utilizados em cada estação de monitorização, adaptado de [30].

Sensor	Local
Sensor de nível (laser)	Arroyo Seco, Big Tujunga, Dunsmore 1.
Sensor de nível (sónico)	Dunsmore2, Jesusita.
Sensor de medição da pressão intersticial	Em todos.
Udógrafo	Em todos.
Sensor de medição do teor em água do solo	Em todos exceto Big Tujunga.
Câmara de vídeo	Dunsmore 2.

Para determinar a duração e a magnitude das aluviões foram utilizadas as medições de nível por parte dos sensores a laser e ultrassónicos. Em cada estação foi colocado um sensor de medição da pressão intersticial a diferentes profundidades: em Dunsmore 1 e Big Tujunga o sensor foi colocado à superfície, estando ancorado ao leito; nas restantes locais os sensores foram colocados a profundidades entre os 10 a 30 cm, em material solto do leito do canal. Em janeiro de 2010 ocorreu uma aluvião que destruiu os sensores de nível e de pressão das estações de Dunsmore 1 e de Big Tujunga.

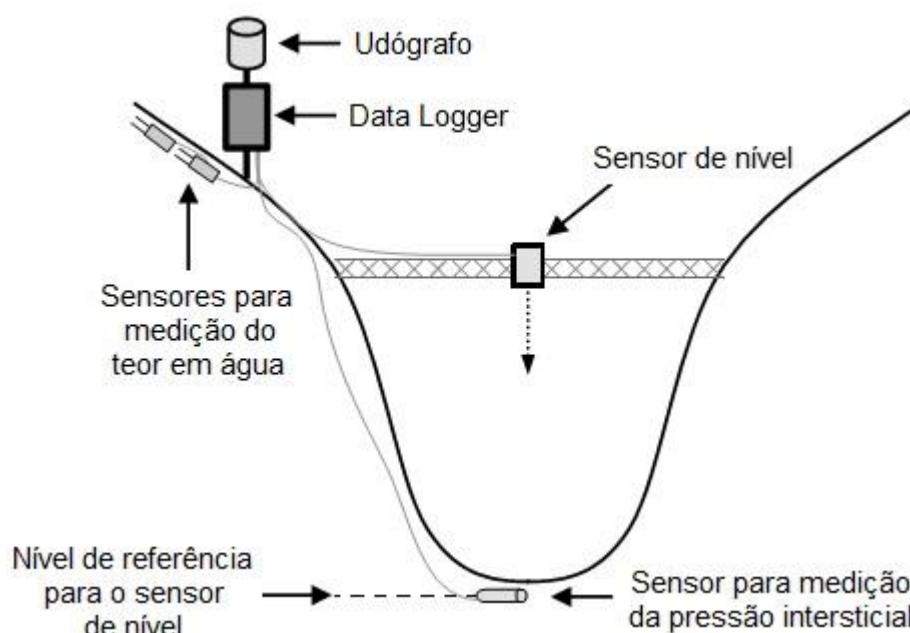


Figura 2.27 - Diagrama tipo de uma estação de monitorização, adaptado de [30].

A medição da precipitação era realizada através de um udógrafo de báscula. Foram colocados dois sensores de medição do teor em água perto do udógrafo. Estes estavam 5 cm abaixo da superfície do solo e tinham o objetivo de determinar a relação existente entre o teor em água da vertente e a magnitude das aluviões.

Na estação de Dunsmore 2 foi instalada uma câmara de vídeo, com uma taxa de captação de quatro *frames* por segundo, como forma de obter um registo visual do comportamento das aluviões e também como forma de determinar as velocidades da frente das vagas. Como material auxiliar à câmara foram colocados holofotes, no entanto a iluminação fornecida por estes não era suficiente para medir a velocidade de eventos que ocorressem durante a noite. Consequentemente, apenas durante o período diurno foi possível registar a velocidade.

Todas as estações de monitorização foram desativadas em 2010 devido ao rápido crescimento da vegetação após os incêndios, que diminuía a ocorrência de aluviões, pois tendo sido estes locais escolhidos para estudar o efeito dos incêndios na ocorrência de aluviões não seria exequível o continuar da monitorização.

Capítulo 3

PROPOSTA DE APLICAÇÃO DE UM SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO A UMA BACIA HIDROGRÁFICA DA RAM

3.1. CARACTERIZAÇÃO BIOFÍSICA DA BACIA

3.1.1. ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO

Para a aplicação de um sistema de monitorização foi selecionada a bacia hidrográfica da Ribeira de Machico. Esta bacia está inserida no concelho de Machico, sendo este limitado a Noroeste pelo concelho de Santana, a Sul pelo concelho de Santa Cruz e a Sudoeste pelo concelho do Funchal, como ilustrado na Figura 3.1. Por sua vez, a bacia hidrográfica da Ribeira de Machico é limitada pelas bacias hidrográficas da Ribeira do Juncal (Porto da Cruz), do Caniçal, da Ribeira de São Roque do Faial, da Ribeira de Santa Cruz, da Ribeira do Moreno (Santa Cruz) e da Ribeira do Seixo (Água de Pena).

A bacia está localizada geograficamente, aproximadamente, entre os paralelos $32^{\circ}45'18''\text{N}$ e $32^{\circ}42'32''\text{N}$ e os meridianos $16^{\circ}51'01''\text{W}$ e $16^{\circ}45'14''\text{W}$.



Figura 3.1 - Concelhos da Ilha da Madeira e bacia hidrográfica da Ribeira de Machico.

3.1.2. GEOMORFOLOGIA

A bacia hidrográfica da Ribeira de Machico apresenta um relevo com predominância de declives moderados, com exceção do vale de Machico, que a jusante exibe um perfil transversal em forma de U, assimétrico, com declives suaves, muito diferente dos restantes vales da Madeira, que geralmente são encaixados. A montante da Ribeira Seca o perfil transversal torna-se encaixado e simétrico [51]. Através da computação da bacia no *software* ArcGIS foi obtido um declive médio de 29.9 %.

3.1.3. PRECIPITAÇÃO

A precipitação em Machico varia de forma pouco significativa, como acontece em toda a ilha. Na zona de montante da bacia, a precipitação média anual varia entre os 1600 e 2000 mm, enquanto a jusante esta é inferior a 800 mm (*vide* Figura 3.2) [Fonte: Agência Portuguesa do Ambiente – Atlas do Ambiente].

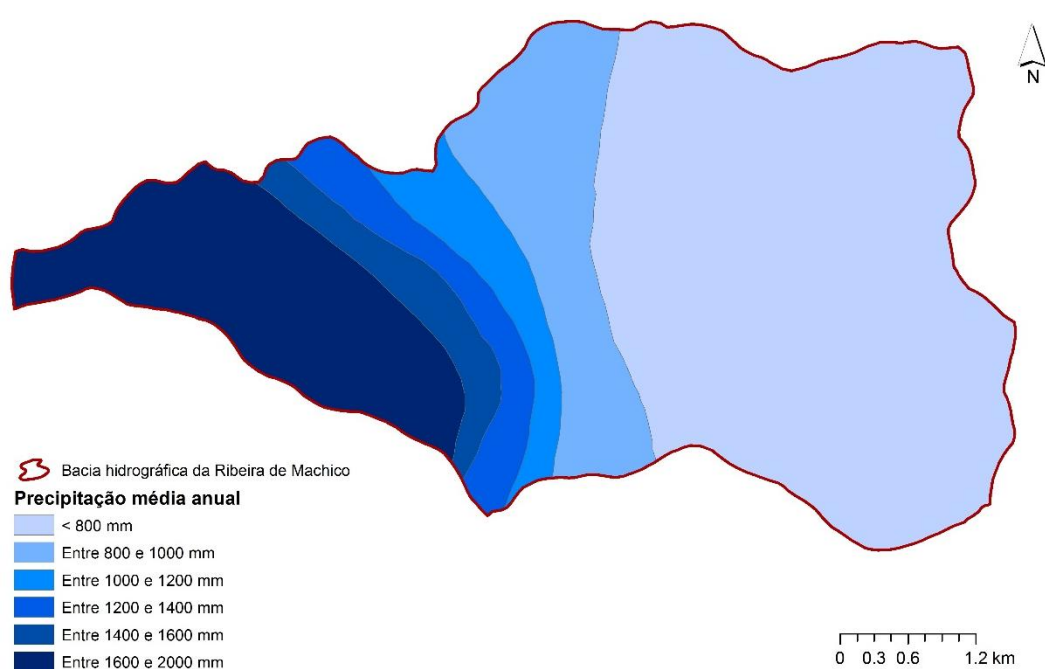


Figura 3.2 - Precipitação média anual.

3.1.4. GEOLOGIA

Para a análise hidrológica de uma bacia hidrográfica é importante o conhecimento das suas características geológicas no que diz respeito à permeabilidade. Uma bacia permeável permite a infiltração de água, evitando o escoamento rápido e pontas de cheia maiores, bem como retarda a erosão do solo.

De acordo com a Carta Geológica da Ilha da Madeira [57], a bacia hidrográfica da Ribeira de Machico está inserida nos Complexos Vulcânicos Intermédio (CVM) e Superior (CVS), sendo o CVS o complexo vulcânico mais recente, logo aquele que apresenta maior permeabilidade. A zona de montante da bacia é formada pelo CVM e CVS, o percurso intermédio também pelo CVM e CVS e com presença de depósitos de vertentes. A zona a jusante é formada maioritariamente por depósitos de vertente e zonas de aluvião.

3.1.5. SOLOS

Os tipos de solos da bacia hidrográfica da Ribeira de Machico foram definidos com base na Carta de Solos da Ilha da Madeira [48]. A análise do solo pode ser realizada através de duas zonas distintas: foz e zonas de vertente. Na foz encontram-se presentes depósitos de praia (DP) e acumulações salinas (S). Nas zonas de vertente estão presentes *Vertisols* (VR) – *Eutric Vertisols* (VRe4 e VRe1); *Cambosols* (CM) – *Chromic Cambosols* (CMx3) e *Humic Cambosols* (CMu1); Terreno Rochoso – Terreno Rochoso Êutrico (TRe3); *Andosols* (AN) – *Umbric Andosols* (ANu2, ANu8, ANu9 e ANu18); *Phaeozems* (PH) – *Haplic Phaeozems* (PHh11 e PHh16) e *Fluvisols* (FL) – *Eutric Fluvisols* (FLe16).

3.1.6. COBERTURA VEGETAL

O coberto vegetal da bacia da Ribeira de Machico é muito variado. Este representa um papel importante no âmbito do escoamento superficial e da erosão da bacia, na medida em que retarda o escoamento superficial, favorecendo a infiltração, e contribui para a redução da erosão do solo. De acordo com a nota explicativa da Carta de Solos [48], estão presentes “Superfícies agrícolas com várias árvores de fruto” (Mancha nº.16); “Culturas,

nomeadamente, bananal, cana-de-açúcar e hortícolas” (Mancha nº.17); “Superfícies agrícolas e florestais (de espécies exóticas)” (Mancha nº.18); “Culturas” (Mancha nº.19); “Culturas, incluindo fruteiras das regiões temperadas. Pinhal. Floresta de loureiros” (Mancha nº.20); “Matas de espécies exóticas e mato, essencialmente” (Mancha nº.27); “Culturas, incluindo fruteiras de regiões temperadas” (Mancha nº.28); “Culturas incluindo vinhas” (Mancha nº.29, 30 e 31); “Culturas e mato” (Mancha nº.32) e “Mato, prado natural de altitude, matas de espécies exóticas e culturas, incluindo vinha” (Mancha nº.81).

3.1.7. OCUPAÇÃO DO SOLO

Entre 1963 e 1991 foi realizada uma comparação do uso do solo através de uma análise fotográfica do vale de Machico, *vide* Figura 3.3, por Rodrigues [51]. O vale foi dividido em quatro zonas consoante o uso do solo: zona agrícola abandonada, zona agrícola, zona urbanizada e zona com erosão.

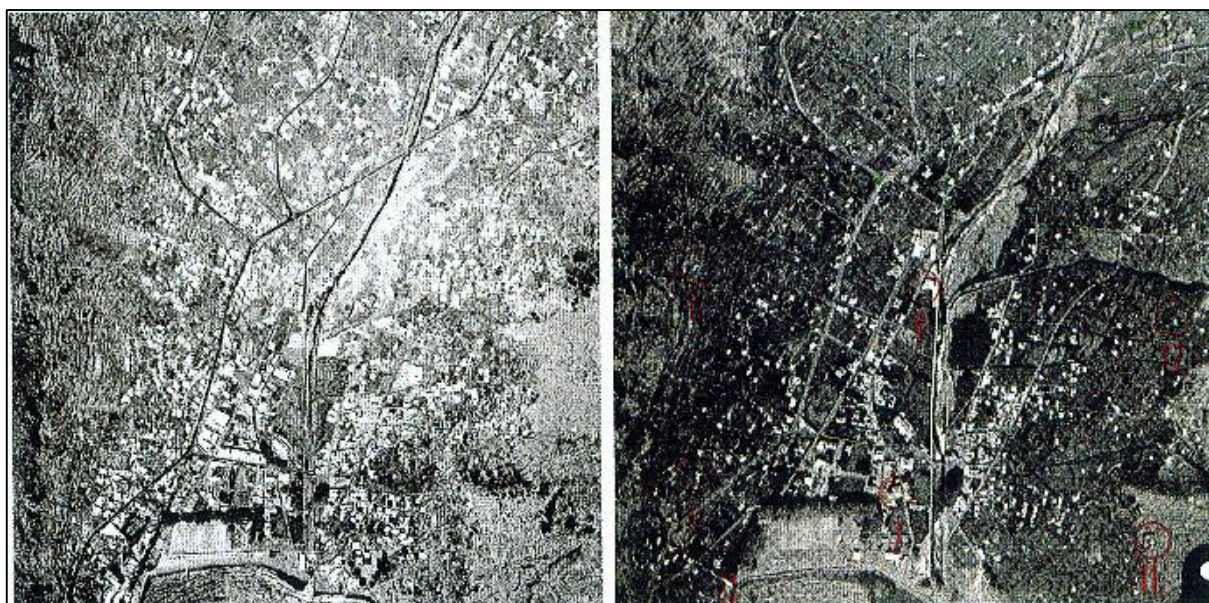


Figura 3.3 - Fotografias aéreas da bacia de Machico em 1963 (à direita) e em 1991 (à esquerda) [51].

Em 1963, o núcleo urbano era reduzido, sendo predominantes as zonas agrícolas. No entanto, nos anos 70 houve um recuo nas plantações agrícolas, dando lugar a um crescimento das zonas urbanas. Na Figura 3.4 é possível ver um recuo das áreas agrícolas: em 1963 ocupavam cerca 55 % do solo e em 1991 apenas 4 %, aproximadamente. A par da diminuição das zonas

agrícolas observou-se um aumento das zonas urbanizadas, onde em 1963 rondavam os 1 % e em 1991 eram cerca de 19%.

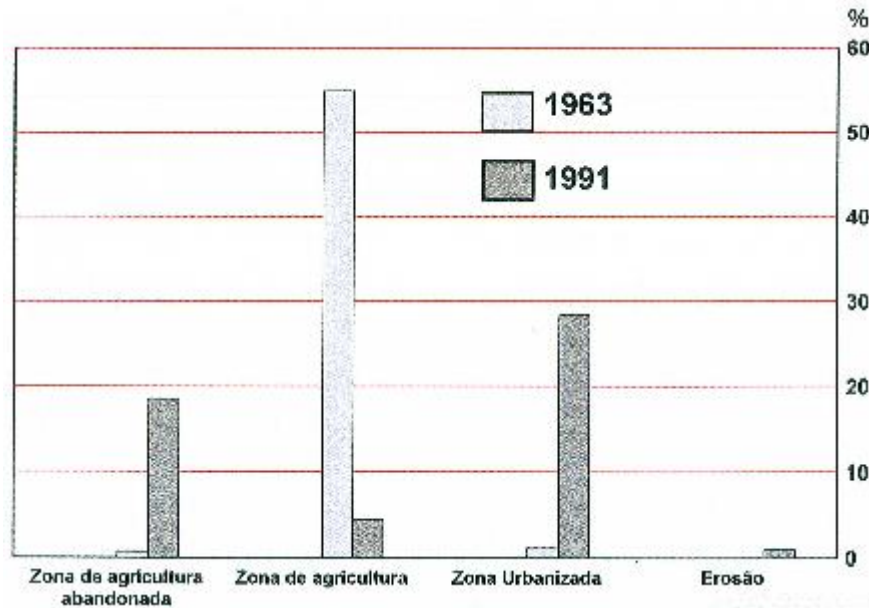


Figura 3.4 - Comparação do uso do solo em 1963 e 1991 [51].

3.2. ANÁLISE MORFOLÓGICA DA BACIA

Entende-se por bacia hidrográfica a área de uma determinada secção de um curso de água, onde toda a água, proveniente quer de escoamento superficial quer de escoamento subterrâneo, é captada e escoada para uma secção de saída, denominada secção de referência [44],[50].

A delimitação da bacia é realizada através de dois tipos de limites de separação de águas: um limite topográfico ou superficial e um limite freático ou subterrâneo [47],[50]. Em solos impermeáveis, os limites da bacia são definidos tendo em conta a topografia, através das linhas de fecho. Em solos permeáveis, devido à influência do escoamento subterrâneo, a delimitação da bacia não é tão linear. A bacia hidrográfica definida através de águas subterrâneas pode deixar de ser exatamente igual àquela definida topograficamente; em solos de formações cársicas ou de origem vulcânica a circulação subterrânea é significativa, não podendo, por isso, deixar de ser equacionada. No entanto, para efeitos práticos, consideram-se os limites da bacia aqueles definidos através da topografia.

No estudo do comportamento hidrológico de uma bacia interessa analisar as características morfológicas que influenciam o escoamento da água: área de drenagem, forma da bacia, rede

de drenagem e relevo. As propriedades morfológicas da bacia hidrográfica da Ribeira de Machico que se seguem foram obtidas através de um *software* de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), o ArcGIS.

3.2.1. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DA BACIA

3.2.1.1. ÁREA DE DRENAGEM

A área de drenagem de bacia hidrográfica corresponde à projeção horizontal da superfície da bacia, depois de definidos os respetivos limites. Geralmente é expressa em quilómetros quadrados (km²) ou em hectares (ha). Após a análise em ArcGIS obteve-se uma área de drenagem correspondente a, aproximadamente, 24.12 km².

3.2.1.2. FORMA DA BACIA

A forma da bacia está diretamente relacionada com a maior ou menor suscetibilidade da ocorrência de cheias, pois sua reação à ocorrência de precipitações intensas será diferente consoante a forma for alongada ou arredondada. Uma bacia com forma arredondada tende a favorecer a concentração de escoamento superficial, originando cheias de maior ponta [47]. Uma das maneiras de avaliar a forma da bacia é através do Índice de Compacidade ou Índice de Gravelius.

Índice de Compacidade, K_c

Relaciona o perímetro da bacia e o perímetro de uma bacia de igual área mas com forma circular. É um coeficiente adimensional, que varia com a forma da bacia: quanto mais irregular for a forma, maior será o valor do coeficiente e menor será a tendência para a formação de cheias. É obtido através da expressão (1):

$$K_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0.282 \frac{P}{\sqrt{A}} = 1.43 , \quad (1)$$

onde K_C representa o índice de compacidade [-], P representa o perímetro da bacia em [km] e A a área da bacia em [km²]. Dependendo do valor do coeficiente K_C , a bacia pode apresentar diversas formas [44]. Se:

- $K_C < 1$ obtém-se uma bacia arredondada;
- $K_C = 1$ obtém-se uma bacia circular;
- $K_C = 1.128$ obtém-se uma bacia quadrada;
- $K_C > 1.128$ é necessário calcular o Índice de Alongamento, K_L ;
- $K_L > 2$ obtém-se uma bacia alongada.

O Índice de Alongamento é representado por (2):

$$K_L = \frac{L'}{b} = 4.23, \quad (2)$$

onde K_L representa o índice de alongamento [-], L' representa o comprimento de um retângulo equivalente em [km] e b a largura em [km]. O comprimento e a largura do retângulo equivalente são obtidos a partir das equações (3) e (4), respetivamente:

$$L' = \frac{K_C \sqrt{A}}{1.128} \left| 1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{K_C} \right)^2} \right| = 10.10 \quad (3)$$

$$b = \frac{K_C \sqrt{A}}{1.128} \left| 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{K_C} \right)^2} \right| = 2.39. \quad (4)$$

3.2.1.3. FATOR DE FORMA, K_F

O Fator de Forma consiste num outro índice de definição da maior ou menor suscetibilidade de uma bacia às cheias. Este relaciona a largura média da bacia hidrográfica e o comprimento do seu maior curso de água. Por sua vez, a largura média corresponde à razão entre a área da bacia e o seu comprimento. Assim, pela equação (5):

$$K_f = \frac{\bar{l}}{L} = \frac{A}{L^2} = 0.19, \quad (5)$$

em que K_f representa o fator de forma [-], \bar{l} a largura média da bacia [km], L o comprimento total do curso de água principal [km] e A a Área da bacia [km²].

Uma bacia com um Fator de Forma baixo está menos sujeito a cheias que outra do mesmo tamanho mas com maior Fator de Forma. Bacias alongadas apresentam um Fator de Forma baixo, pois a probabilidade de ocorrer precipitação intensa em toda a extensão da bacia é pequena.

Na Tabela 3.1 estão identificados os resultados dos parâmetros relacionados com a forma da bacia da Ribeira de Machico. Obteve-se um valor de 1.43 para o Índice de Gravelius. Como este era superior a 1.128 foi necessário calcular o Índice de Alongamento, tendo-se obtido 4.23. Assim, como K_L é superior a 2, deduz-se que a bacia é alongada o que implica a presença de cursos de água mais longos, maiores tempos de escoamento e um maior tempo de resposta em caso de cheia. Quanto ao Fator de Forma, este apresenta um valor de 0.19, um valor baixo, que implica uma bacia com melhor reação à ocorrência de cheias.

Tabela 3.1 - Resumo das características geométricas da bacia hidrográfica.

Área, A [km²]	24.12
Perímetro, P [km]	24.97
Índice de Compacidade, K_c [-]	1.43
Índice de Alongamento, K_L [-]	4.23
Comp. do ret. equivalente, L' [km]	10.10
Largura do ret. equivalente, b [km]	2.39
Fator de forma, K_f [-]	0.19

3.2.2. CARACTERÍSTICAS DA REDE DE DRENAGEM

Uma bacia hidrográfica é composta por um curso de água principal e pelos seus tributários (ou afluentes), formando-se, assim uma rede de drenagem, mais ou menos complexa dependendo do grau de ramificação. A rede de drenagem traduz-se na maior ou menor facilidade com que a água atinge a secção de referência e é caracterizada pela constância do escoamento, pela ordem da rede, pela densidade de drenagem e pelo percurso médio do escoamento superficial [44]. Serie 2 nº1

3.2.2.1. CONSTÂNCIA DO ESCOAMENTO

Os cursos de água podem ser divididos em três categorias, consoante o regime do escoamento: efémeros; intermitentes ou permanentes. Um curso de água é efémero quando transporta apenas escoamento superficial, após ou durante um período de precipitação, não havendo contribuição do escoamento subterrâneo. São intermitentes quando transportam água durante uma parte do ano, geralmente durante as estações húmidas, secando no período estival. São permanentes quando transportam água durante o ano inteiro, devido à presença de escoamento subterrâneo [44].

Relativamente ao curso de água principal da bacia hidrográfica da Ribeira de Machico, após observação direta da ribeira no período estival, é possível afirmar que o regime de escoamento é do tipo permanente.

3.2.2.2. HIERARQUIZAÇÃO DA REDE DE DRENAGEM

É uma classificação que reflete o grau de ramificação ou bifurcação existente numa bacia hidrográfica [44]. Para a análise do grau de ramificação foi adotada a Classificação de Strahler, que consiste em separar os cursos de água da bacia segundo uma ordem. Cada curso de água sem tributários é de 1ª ordem. Cada vez que dois cursos de água da mesma ordem confluem, esta sobe um valor, ou seja, quando dois cursos de água de ordem 1 se unem, o curso de água seguinte será de ordem 2, e assim sucessivamente. No entanto, se confluírem dois cursos com ordens diferentes prevalece a maior ordem.

A classificação de Strahler foi realizada com recurso ao ArcGIS, tendo-se obtido uma bacia de ordem 5, ou seja, uma bacia bem drenada, sendo por isso, sujeita à ocorrência de cheias. Na Figura 3.5 é possível notar a ordem de cada curso de água da bacia.

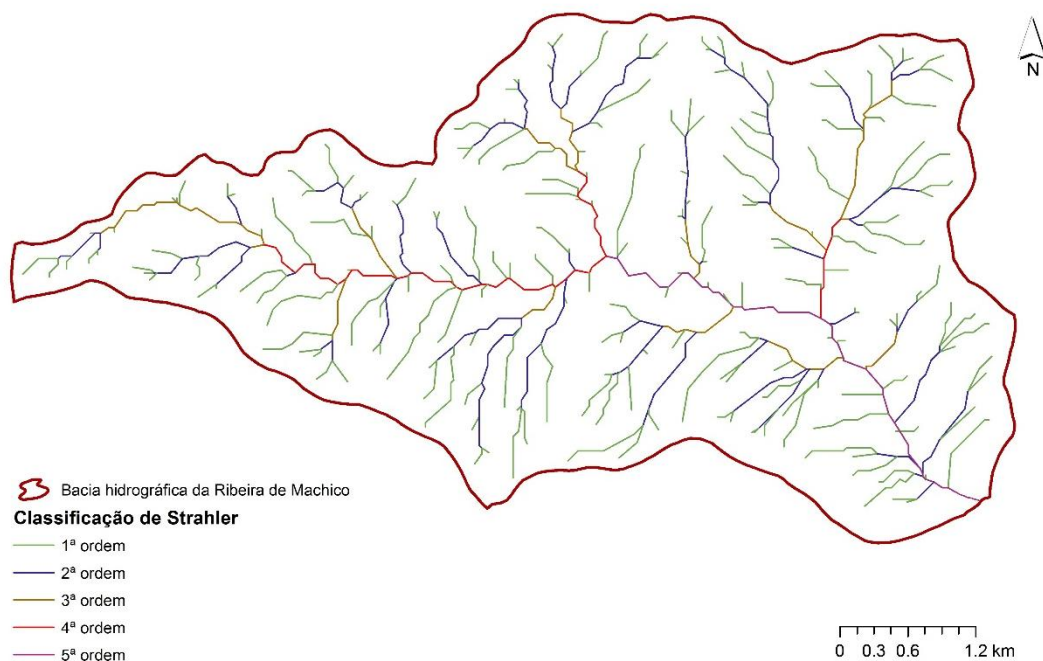


Figura 3.5 - Classificação de Strahler para a bacia da Ribeira de Machico.

A bacia apresenta um total de 272 cursos de água, com um comprimento total de 96.51 km. Na Tabela 3.2 estão identificados o número de ordem dos cursos de água da bacia, assim como a respetiva quantidade e comprimento.

Tabela 3.2 - Hierarquização da rede segundo a classificação de Strahler.

Ordem	Nº. cursos de água	Comprimento [km]
1	205	53.14
2	50	23.77
3	13	9.72
4	3	5.52
5	1	4.36
Total	272	96.51

3.2.2.3. RELAÇÃO DE BIFURCAÇÃO, R_b

A Relação de bifurcação pode ser definida como sendo a relação entre o número total de cursos de água de determinada ordem e o número total dos de ordem imediatamente superior. É determinada a partir da expressão (6):

$$R_b = \frac{N_u}{N_{u+1}}, \quad (6)$$

em que R_b corresponde à relação de bifurcação média [-], N_u representa o número de cursos de água de uma determinada ordem [-] e N_{u+1} representa o número de cursos de água da ordem seguinte [-].

Assim, a relação de bifurcação associada à rede de drenagem da bacia encontra-se calculada na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Relação de bifurcação.

Ordem	Nº. cursos de água	R_b [-]
1	205	4.10
2	50	3.85
3	13	4.33
4	3	3.00
5	1	--

Por sua vez, a Relação de bifurcação média é determinada a partir da expressão (7):

$$\bar{R}_b = \sqrt[n-1]{N_1} = 3.78, \quad (7)$$

em que \bar{R}_b representa a relação de bifurcação média [-], n corresponde à ordem máxima da bacia [-] e N_1 corresponde ao número de cursos de água de ordem 1 [-].

3.2.2.4. DENSIDADE DE DRENAGEM, DD

Corresponde à relação entre o comprimento total de todos os cursos de água da bacia e a sua área. É representada pela expressão (8):

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{A} = 4.00 \text{ km/km}^2, \quad (8)$$

em que D_d corresponde à densidade de drenagem [km/km²], $\sum_{i=1}^n L_i$ equivale ao somatório do comprimento total dos cursos de água da bacia [km] e A a área da bacia [km²].

Fornece uma indicação acerca da eficiência de drenagem da bacia: varia entre 0.5 km/km² e 3.5 km/km², ou superior, para bacias mal drenadas e bem drenadas, respetivamente. Uma bacia bem drenada, com uma densidade de drenagem elevada, apresenta solos impermeáveis e/ou o relevo acentuado, favorecendo o escoamento superficial e aumentando, conseqüentemente, o risco de cheia. Em contraste, uma bacia mal drenada é constituída por solos permeáveis e/ou relevo suave, apresentando um menor risco de cheia [44].

A Densidade de drenagem da bacia da Ribeira de Machico corresponde a 4.00 km/km², indicando uma bacia bem drenada, suscetível à ocorrência de cheias. A Tabela 3.4 resume os parâmetros utilizados no cálculo da Densidade de drenagem, nomeadamente o comprimento total dos cursos de água e área da bacia.

Tabela 3.4 - Parâmetros para o cálculo da Densidade de drenagem.

Densidade de drenagem, D_d [km/km ²]	Comp. total dos cursos de água da bacia, L_i [km]	Área da bacia [km ²]
4.00	96.51	24.12

3.2.2.5. *PERCURSO MÉDIO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL SOBRE O TERRENO DESDE O LIMITE DA BACIA ATÉ UM CURSO DE ÁGUA, \bar{P}_L*

Representa o percurso médio que a água tem de percorrer desde o limite da bacia até encontrar um curso de água. É obtido pela expressão (9):

$$\bar{P}_L = \frac{1}{2D_d} = 0.1250 \text{ km}, \quad (9)$$

onde \bar{P}_L corresponde ao percurso médio do escoamento superficial sobre o terreno desde o limite da bacia até um curso de água [km] e D_d corresponde à densidade de drenagem [km/km²]. O resultado corresponde a 0.1250 km (ou 125.0 m), com uma densidade de drenagem equivalente a 4.00 km/km².

3.2.2.6. PERCURSO MÉDIO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL SOBRE O TERRENO ATÉ UM CURSO DE ÁGUA, \bar{P}

Representa a distância média que a água tem de percorrer até atingir o curso de água mais próximo. O Percurso médio é obtido através da expressão (10):

$$\bar{P} = \frac{1}{4D_d} = 0.0625 \text{ km}, \quad (10)$$

onde \bar{P} corresponde ao percurso médio do escoamento superficial sobre o terreno até atingir um curso de água [km] e D_d corresponde à densidade de drenagem [km/km²]. O resultado corresponde a 0.0625 km (ou 62.5 m), com uma densidade de drenagem equivalente a 4.00 km/km².

3.2.2.7. DENSIDADE HÍDRICA, D_h

A Densidade hídrica é definida pelo número de cursos de água de uma bacia por unidade de área. Tem como objetivo comparar a quantidade de cursos de água existentes numa determinada área, sendo calculada pela expressão (11):

$$D_h = \frac{N}{A} \approx 11 \text{ cursos de água/km}^2, \quad (11)$$

em que D_h corresponde à densidade hídrica [cursos de água/km²], N corresponde ao número total de cursos de água da bacia e A representa a área da bacia [km²].

3.2.2.8. TEMPO DE CONCENTRAÇÃO

O tempo de concentração corresponde ao tempo que a gota de água precipitada no ponto da bacia hidrográfica cinematicamente mais afastado da secção de referência demora a atingir tal secção [44], ou seja, é o tempo após o qual todos os pontos da bacia contribuem para o escoamento. É um parâmetro que depende de diversos fatores como a área da bacia, o seu declive médio ou o comprimento total do curso de água principal, em que quanto maior for a declividade, menor será o tempo de concentração, maior será a suscetibilidade de cheia [18].

Pode ser determinado a partir de diversas formas, destacando-se a Fórmula de Témez, a Fórmula de Giandotti e a Fórmula de Ven Te Chow.

A Fórmula de Témez é representada pela expressão (12):

$$t_c = 0.3 \left(\frac{L}{i_{méd}^{0.25}} \right)^{0.76} = 2.93 h, \quad (12)$$

onde, t_c corresponde ao tempo de concentração [h], L representa o comprimento total do curso de água principal [km] e $i_{méd}$ o declive médio do curso principal [m/m].

A Fórmula de Giandotti é representada por (13):

$$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{H}} = 2.24 h, \quad (13)$$

onde t_c corresponde ao tempo de concentração [h], A representa a área da bacia [km²], L o comprimento total do curso de água principal [km] e \bar{H} a altura média da bacia [m].

A Fórmula de Ven Te Chow é apresentada por (14):

$$t_c = 0.8773 \left(\frac{L}{\sqrt{i_{méd}}} \right)^{0.64} = 0.95 h, \quad (14)$$

onde, t_c corresponde ao tempo de concentração [h], L representa o comprimento total do curso de água principal [km] e $i_{méd}$ representa o declive do curso de água principal [m/km].

Às bacias hidrográficas da região estão associados baixos tempos de concentração que, aliados a grandes declives e a zonas urbanas relativamente densas, tornam-se em territórios propensos à propagação de cheias com carácter destrutivo. Assim, a aplicação de sistemas de monitorização poderá ser menos eficaz que em bacias com tempos de concentração baixos.

O tempo de concentração segundo as diferentes formas está representado na Tabela 3.5. Este foi obtido através da média dos dois valores mais próximos, pelo que a bacia da Ribeira de Machico apresenta um tempo de concentração de 2.59 h, ou 2h 35min.

Tabela 3.5 - Tempo de concentração segundo as fórmulas de Témez, Giandotti e Ven Te Chow.

t_c (Témez) [h]	t_c (Giandotti) [h]	t_c (Ven Te Chow) [h]
2.93	2.24	0.95

3.2.2.9. TEMPO DE RESPOSTA

Entende-se por tempo de resposta o tempo de reação da bacia à precipitação útil, aquela que gera escoamento superficial, responsável pela ponta de cheia [63]. É obtido através da expressão (15):

$$t_r = 0.6t_c = 1.55 \text{ h} \quad (15)$$

onde t_r corresponde ao tempo de resposta [h] e t_c ao tempo de concentração [h].

Assim, a bacia apresenta um tempo de resposta de 1.55 h ou 1h 33min, o que é um valor baixo em caso de necessidade de alerta.

3.2.3. CARACTERÍSTICAS DO RELEVO

3.2.3.1. CURVA HIPSOMÉTRICA

A Curva hipsométrica corresponde à representação gráfica do relevo de uma bacia e relaciona as cotas da superfície do terreno com as áreas das zonas da bacia situadas acima dessas cotas, em referência ao nível médio da água do mar [47].

Para a determinação da hipsometria da bacia foram criadas curvas de nível de 50 em 50 m no ArcGIS, tendo sido determinadas as áreas entre cotas, disponíveis no Anexo I. A Curva hipsométrica da bacia da Ribeira de Machico assume a forma representada na Figura 3.6.

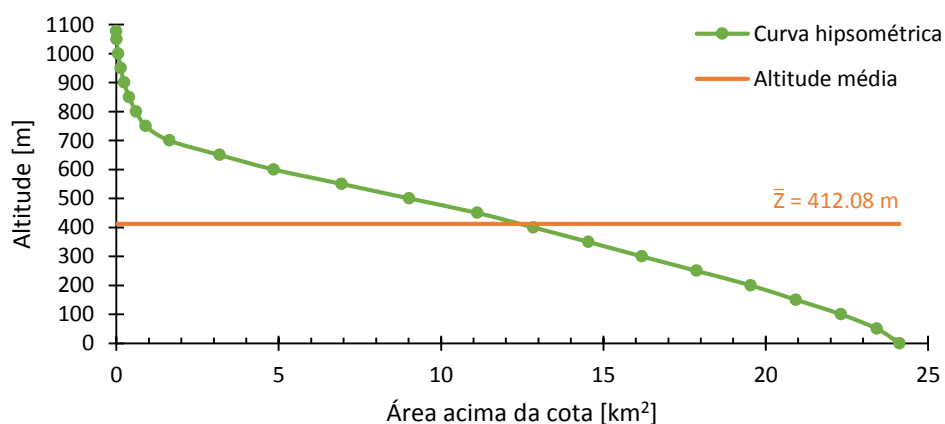


Figura 3.6 - Curva hipsométrica.

Através da computação da bacia em ArcGIS foi obtida a curva hipsométrica representada pela Figura 3.7.

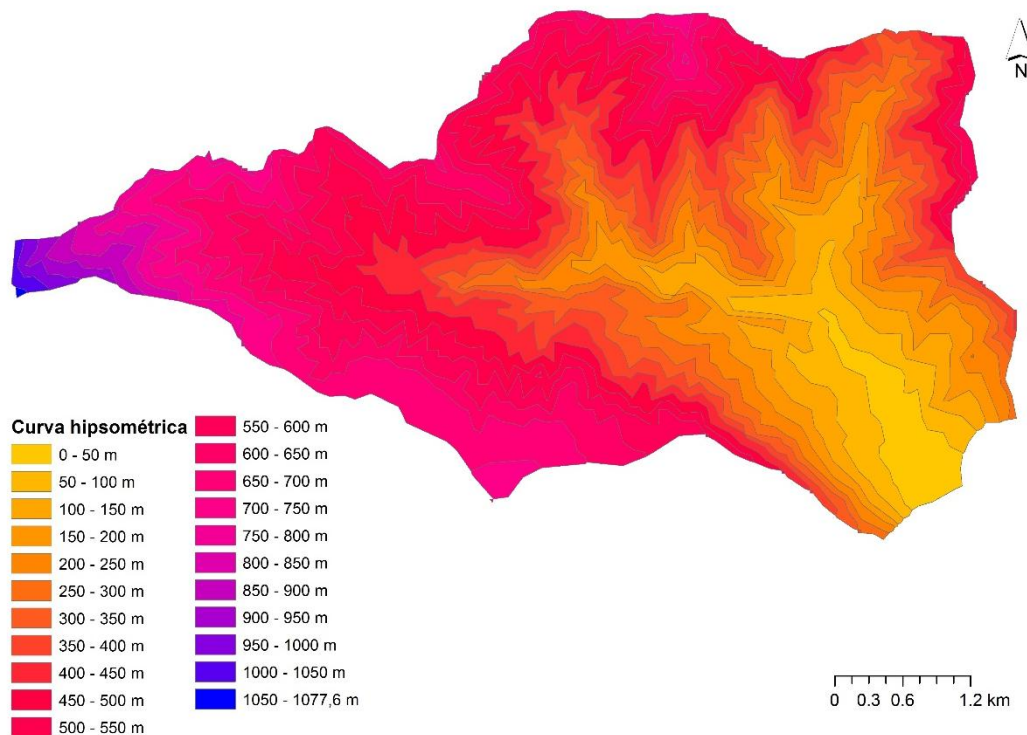


Figura 3.7 - Curva hipsométrica obtida por ArcGIS.

3.2.3.2. CURVA HIPSOMÉTRICA ADIMENSIONAL

Revela o estado de maturidade da bacia, em que a bacia pode ser classificada como apresentando um estado de maturidade jovem (apresenta um grande potencial erosivo), estado de maturidade intermédio e estado de maturidade antigo (vide Figura 3.8) [44].

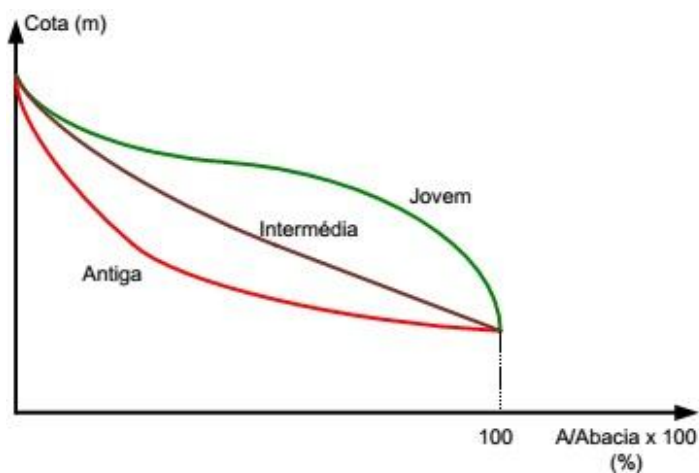


Figura 3.8 - Curvas hipsométricas adimensionais [40].

Através da análise da Curva hipsométrica adimensional da bacia, ilustrada na Figura 3.9, é possível identificar um estado de erosão acentuado, sendo por isso uma bacia com estado de maturidade antigo.

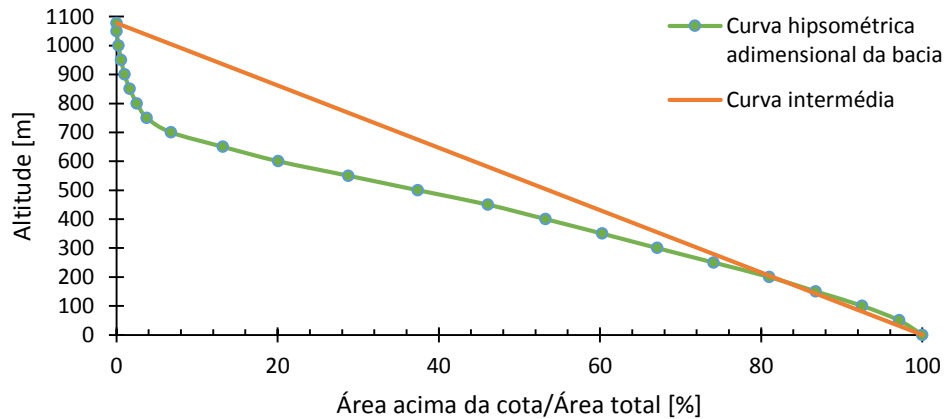


Figura 3.9 - Curva hipsométrica adimensional da bacia da Ribeira de Machico.

3.2.3.3. ALTITUDE E ALTURA MÉDIA

A Altitude média é calculada a partir da expressão (16):

$$\bar{Z} = \frac{1}{A} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{2} (Z_i + Z_{i+1}) \times A'_i = 412.08 \text{ m}, \quad (16)$$

em que, \bar{Z} representa a altitude média [m], A a área da bacia [km²], Z a altitude [m] e A' a área entre cotas [km²]. A área entre cotas encontra-se definida no Anexo I.

Por sua vez, a Altura média corresponde à diferença entre a Altitude média e a Altitude mínima, calculada a partir da equação (17):

$$\bar{H} = \bar{Z} - Z_{min} = 412.08 \text{ m}, \quad (17)$$

onde \bar{H} corresponde à altura média [m], \bar{Z} à altitude média [m] e Z_{min} à altitude mínima [m].

3.2.3.4. PERFIL LONGITUDINAL DO CURSO DE ÁGUA PRINCIPAL

O perfil longitudinal de um curso de água é obtido através da relação entre as cotas do leito e a sua distância à foz. Este tem uma grande influência no comportamento de uma bacia

relativamente às cheias, uma vez que a declividade do canal determina a velocidade do escoamento: declives mais acentuados provocam um aumento da velocidade. Na Figura 3.10 está identificado o perfil longitudinal da Ribeira de Machico, notando-se declives suaves a jusante, em oposição a montante, com um declive mais acentuado. No Anexo II estão identificados os pontos necessários à representação gráfica do perfil longitudinal.

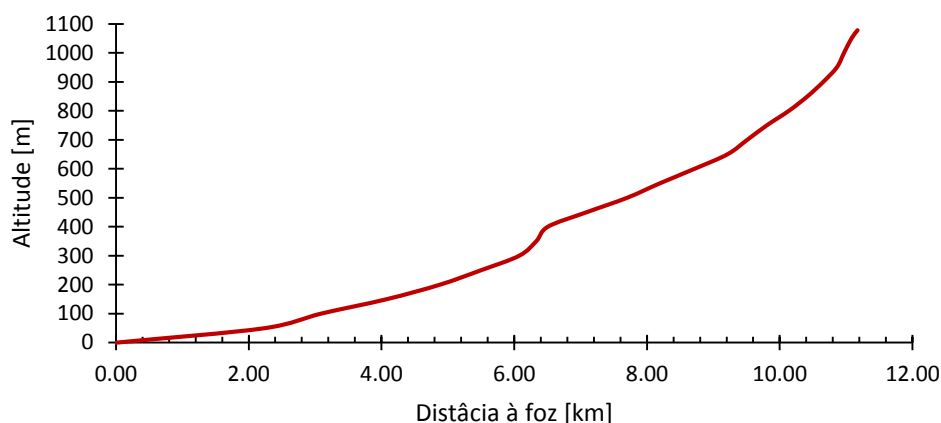


Figura 3.10 - Perfil longitudinal do curso de água principal.

3.2.3.5. DECLIVE MÉDIO DO CURSO DE ÁGUA PRINCIPAL

É obtido através da diferença entre a cota máxima e mínima do curso de água principal e o seu comprimento total, não traduzindo com precisão a influência do declive. Resulta da expressão (18):

$$i_{méd} = \frac{Z_{máx} - Z_{mín}}{L} = 0.096 \text{ m/m} , \quad (18)$$

em que $i_{méd}$ representa o declive médio do curso de água principal [m/m], $Z_{máx}$ e $Z_{mín}$ representam, as altitudes máximas e mínimas, respetivamente [m] e L representa o comprimento total do curso de água principal [m].

3.2.3.6. DECLIVE 10;85

Corresponde ao declive médio de um troço compreendido entre 10 e 85 % do comprimento total do curso de água principal. Este pode ser o mais representativo do declive real de um

curso de água pois elimina os troços de menor e maior declive. É obtido a partir da equação (19):

$$i_{10;85} = \frac{Z_{85} - Z_{10}}{0.75L} = 0.080 \text{ m/m}, \quad (19)$$

em que $i_{10;85}$ representa o declive 10;85 [m/m], Z_{10} e Z_{85} representam, respetivamente, as altitudes relativamente a 10 e 85 % do comprimento total do curso de água principal [m] e L diz respeito ao comprimento total do curso de água principal [m].

A Figura 3.11 ilustra a representação gráfica do Perfil longitudinal do curso de água principal, bem como os Declives médio e 10;85.

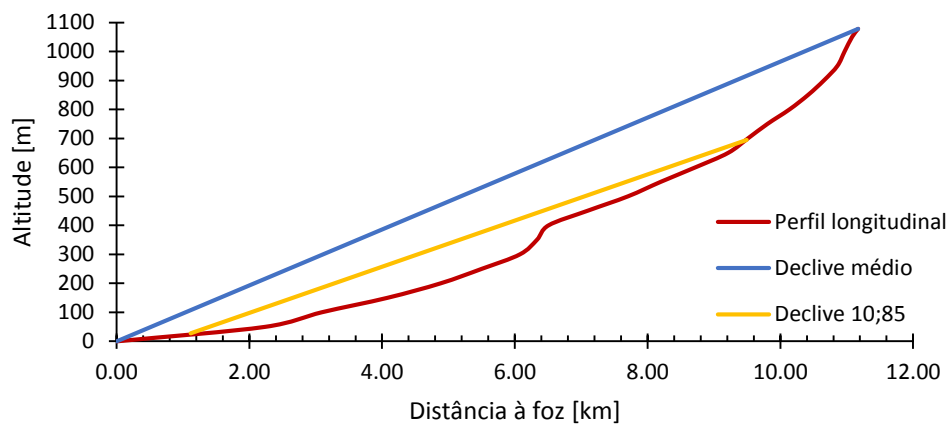


Figura 3.11 - Representação do Perfil longitudinal e dos Declives médio e 10;85.

3.2.3.7. DECLIVE MÉDIO DA BACIA

O Declive médio da bacia, tal como mencionado no início do capítulo 3, no subcapítulo referente à Geomorfologia, foi obtido através da modelação da bacia em ArcGIS, tendo-se obtido o valor de 0.299 m/m.

3.2.3.8. ÍNDICE DE RELEVO, I_R

O Índice de relevo corresponde à relação entre a amplitude altimétrica da bacia e o comprimento total do curso de água principal. A Amplitude altimétrica, A_{alt} , corresponde à

diferença de cotas entre a cota mais elevada da bacia e a da secção de desembocadura, valor este que equivale a 1077.6 m. O Índice de relevo é calculado a partir da expressão (20):

$$I_r = \frac{A_{alt}}{L} = 0.096 \text{ m/m}, \quad (20)$$

em que I_r representa o índice de relevo [m/m], A_{alt} corresponde à amplitude altimétrica [m] e L diz respeito ao comprimento total do curso de água principal [m].

Na Tabela 3.6 é apresentado um resumo das características do relevo da bacia da Ribeira de Machico.

Tabela 3.6 - Resumo das características do relevo da bacia.

Altitude máxima, $Z_{\text{máx}}$ [m]	1077.60
Altitude mínima, Z_{min} [m]	0.00
Altitude média, \bar{Z} [m]	412.08
Altura média, \bar{H} [m]	412.08
Z_{10} [m]	27.48
Z_{85} [m]	695.09
Declive médio, $i_{\text{méd}}$ [m/m]	0.096
Declive 10;58, $i_{10;85}$ [m/m]	0.080
Declive médio da bacia [m/m]	0.299
Índice de relevo [m/m]	0.096

Como resumo, na Tabela 3.7 estão identificados os dados relativos à análise morfológica da bacia hidrográfica da Ribeira de Machico, onde se incluem as características geométricas, as características da rede de drenagem e as características do relevo.

Tabela 3.7 - Resumo das características morfológicas da bacia hidrográfica da Ribeira de Machico.

Características geométricas	
Área da bacia [km²]	24.12
Perímetro da bacia[km]	24.97
Coefficiente de compacidade [-]	1.43
Índice de alongamento [-]	4.23
Fator de forma [-]	0.19

Características da rede de drenagem	
Classificação de Strahler	5ª ordem
Comprimento do curso de água principal [km]	11.17
Comprimento total dos cursos de água [km]	95.51
Percurso médio do escoamento superficial desde o limite da bacia até um curso de água [m]	125.00
Percurso médio do escoamento superficial sobre o terreno até um curso de água [m]	62.50
Relação de bifurcação média [-]	3.78
Densidade de drenagem [km/km ²]	4.00
Densidade hídrica [cursos de água/km ²]	11
Tempo de concentração	2h 35 min
Tempo de resposta	1h 33min
Características do relevo	
Altura média [m]	412.08
Altitude média [m]	412.08
Altitude mínima [m]	0.00
Altitude máxima [m]	1077.60
Declive médio da bacia [m/m]	0.299
Declive médio do curso de água principal [m/m]	0.096
Declive 10;85 [m/m]	0.080
Declive médio da bacia [m/m]	0.299
Índice de relevo [m/m]	0.096

3.3. SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DA RIBEIRA DE MACHICO

3.3.1. NECESSIDADE DE MONITORIZAÇÃO DA BACIA

A bacia hidrográfica da ribeira de Machico, assim como muitas outras bacias da região, é um território sujeito à ocorrência de aluviões. Ao longo das décadas o concelho de Machico, especialmente as freguesias do Porto da Cruz e de Machico, tem sido assolado por diversas enxurradas, resultando grandes perdas humanas e materiais. Através da monitorização dos

cursos de água é possível, de certa maneira, alertar as entidades competentes para um possível fluxo de detritos e prevenir danos maiores.

Assim, nos parágrafos seguintes encontram-se enumerados os equipamentos, e a respetiva localização, de um possível sistema de monitorização automático para a bacia hidrográfica da Ribeira de Machico. São propostas determinadas secções a monitorizar, identificadas na Tabela 3.8. No Anexo III é possível consultar o mapa da bacia com as secções que foram escolhidas para a colocação dos vários equipamentos.

3.3.2. MONITORIZAÇÃO DA ZONA DE MONTANTE DA BACIA

A zona de montante da bacia é aquela que reúne, maioritariamente, as condições para iniciação das aluviões, apesar de no percurso intermédio existirem cursos de água (afluentes do curso de água principal) capazes de transportar grande quantidade de água e material. É nesta área que deverá ser dada especial importância à monitorização da precipitação, bem como ao teor em água do solo e às vibrações induzidas ao solo por um potencial fluxo de detritos.

A zona de montante da Ribeira de Machico é caracterizada pela existência de diversos cursos de água, de declive acentuado, com disponibilidade de material solto e pela elevada densidade populacional ao longo do curso principal, onde em muitos dos casos as habitações partilham os seus muros com os da ribeira. Muitos locais não têm canalização do curso de água, havendo troços do canal com paredes naturais e outros de pedra emparelhada.

A monitorização desta zona poderá ser realizada com recurso a udógrafos, sensores de humidade do solo colocados a diferentes profundidades e geofones a diferentes distâncias. Em cada estação deverá estar incluído um *data logger*, responsável pela aquisição e armazenamento de dados dos equipamentos e um equipamento responsável pela transmissão destes.

Atualmente, a monitorização da precipitação da bacia de Machico é realizada através de quatro udógrafos localizados na ETA (Estação de Tratamento de Águas, cuja entidade responsável é o LREC), no Posto Florestal de Machico, no Santo da Serra e nos Lamaceiros (estes três equipamentos são da responsabilidade da IGA). No entanto, as duas primeiras

estações não estão colocadas em pontos estratégicos, isto é, não monitorizam a precipitação em locais de interesse para a caracterização das precipitações que poderão originar aluviões, pois encontram-se localizados a uma relativa baixa altitude, a cerca de 160 m acima do nível do mar. A estação dos Lamaceiros está localizada na secção de montante da bacia, perto da linha de separação entre bacias hidrográficas, estando o udógrafo do Santo da Serra colocado na Quinta da Junta. Assim, para além destes udógrafos, decidiu-se acrescentar mais três, colocados na cabeceira da sub-bacia da Ribeira Seca, na zona superior da sub-bacia da Ribeira das Cales e outro na zona de montante, a noroeste do Santo da Serra (*vide* Figura 3.12).

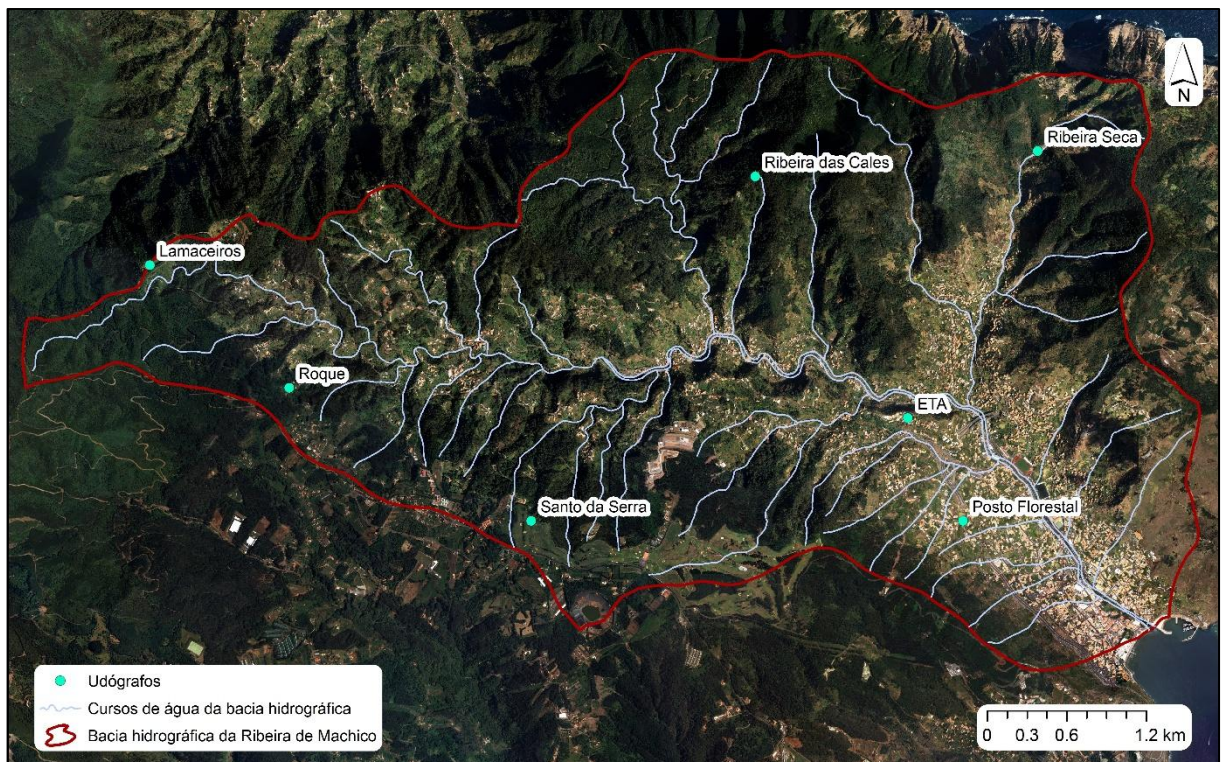


Figura 3.12 - Localização dos udógrafos.

A precipitação é um dos fatores que mais influem na origem das aluviões e investigadores um pouco por todo o mundo têm estudado os níveis de precipitação que estão na origem destes eventos. Estes limites podem ser definidos com base em processos conceituais ou empíricos (com base em eventos históricos e análises estatísticas). Os limites empíricos são estabelecidos após o estudo de eventos de precipitação que originaram deslizamentos de terras ou aluviões, e podem ser agrupados segundo categorias: limites que incluem dados de precipitação obtidos através de eventos específicos de precipitação e limites que incluem condições antecedentes de precipitação [27].

A nível mundial, regional ou local têm sido propostos limites empíricos de precipitação de iniciação destes fenómenos. Em Portugal, para a zona de Lisboa foram definidos limites de precipitação que originavam deslizamentos de terras [69], não havendo qualquer tipo de informação para fluxos de detritos.

Assim sendo, os udógrafos poderão funcionar como sistema de alerta de aluviões em caso de precipitações intensas. O sistema de alerta poderá ser definido com base num total de precipitação durante um intervalo de tempo, constituindo a intensidade de precipitação. Este poderá ser ativado quando um determinado nível de intensidade for ultrapassado. Por exemplo, se durante 10 min forem registados 10 mm ou durante 1 h forem excedidos 100 mm de precipitação é emitido um alerta. No entanto, este nível deverá ser definido e posteriormente calibrado aquando da instalação do equipamento no local e depois de analisados os seus dados, correlacionando-os com as alturas em que acontecem aluviões.

Sugere-se, também, a distribuição de sensores de humidade do solo pelas zonas onde serão colocados os novos udógrafos: Ribeira das Cales e Ribeira Seca. Em cada um destes locais poderão ser instalados três sensores a diferentes profundidades, de modo a que se consiga caracterizar de maneira eficaz a variação do teor em água.

Na zona de montante, na secção 1, propõe-se a colocação de três geofones, espaçados entre si cerca de 25 m, colocados diretamente no solo da margem da ribeira. Esta secção encontra-se identificada na Tabela 3.8, e na respetiva ficha de descrição está representada uma imagem do local, bem como as suas características.

Um ponto importante no desenvolvimento de um sistema de monitorização e alerta eficaz é a definição de um nível de deteção, de modo a que os falsos alarmes possam ser reduzidos a um mínimo. Com base em Abancó [2], é possível definir o tal nível de deteção através do da vibração do solo. Os valores limites para a vibração do solo deverão ser definidos para cada geofone, pois o modo de colocação e a distância ao canal apresentam grande influência nos valores registados: os valores poderão apresentar grandes diferenças de geofone para geofone.

No entanto, definir um nível de deteção não é uma tarefa fácil, principalmente quando estamos na presença de um sistema de monitorização piloto na região, não havendo quaisquer tipo de dados relativamente às vibrações induzidas ao solo pela passagem de uma

aluvião. Só após a instalação destes é que será possível definir limites e calibrar o sistema. Para a calibração é necessário que ocorram fluxos de detritos para que seja possível registar os sinais de vibração. Outra maneira será com recurso a experiências de campo, isto é, através de simulações.

3.3.3. MONITORIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA ALUVIÃO AO LONGO DO CURSO DE ÁGUA PRINCIPAL

Na secção intermédia do curso de água principal, para além da intersecção de vários afluentes de várias dimensões, existem dois de grandes dimensões, correspondentes à Ribeira das Cales e à Ribeira Seca. Na secção de desembocadura destas secções sugere-se a colocação de sensores de nível com tecnologia de radar, bem como a instalação de câmaras de vídeo.

Os sensores de radar poderão ser instalados numa estrutura fixa em pontes pedonais ou rodoviárias. Dependendo do lugar onde estão colocados, é possível definir um limite a partir do qual o sistema passa a “modo de evento”. A maior parte dos sistemas de monitorização é capaz de alternar entre “modo normal”, com uma baixa taxa de aquisição de dados, e “modo de evento”, com uma elevada taxa de medições. A mudança entre os dois modos é possível através da definição de limites, baseados em dados resultantes das vibrações do solo (registadas pelos geofones), da intensidade de precipitação (através de udógrafos) ou da altura do escoamento (sensores ultrassónicos ou de radar).




Por exemplo, para a secção 3 (*vide* Tabela 3.8) de altura 4.30 m e largura 7.80 m, poderia funcionar um sensor de radar que funcionasse como meio de alerta a um possível evento. No “modo normal”, a cada 45 min seria registado o valor da altura do escoamento. Se fosse detetada uma altura de escoamento superior a 1.50 m o sistema passa a “modo de evento”, e a cada segundo seria registado o nível do escoamento.




No percurso intermédio do curso de água principal, na zona dos Maroços, propõe-se a instalação de três geofones na margem direita da ribeira, espaçados entre si cerca de 20 m, correspondendo este local à secção 4. Nesta mesma secção, na estrutura da ponte da Via Rápida, propõe-se a colocação de um sensor de nível de radar. Esta secção é caracterizada por uma altura desde o leito da ribeira até ao tabuleiro da ponte de, aproximadamente, 9.8 m.




A localização das câmaras foi escolhida de modo a que estes equipamentos tivessem um campo de visão de pelo menos 10 m, sem obstáculos pela frente, nomeadamente vegetação, e também tendo em consideração a facilidade de acesso ao local. Geralmente, foram colocadas na mesma secção que os sensores de radar de modo a partilhar a mesma fonte de alimentação.

Na Tabela 3.8 são apresentadas propostas de secções a monitorizar e a respetiva descrição, onde estão identificadas características como as coordenadas geográficas, a altura, largura e declive, bem como uma imagem representativa da secção. São propostas 11 secções a monitorizar, definidas tendo em conta a acessibilidade ao local, a existência de secções canalizadas e a confluência de outros cursos de água.

Tabela 3.8 - Proposta de secções a monitorizar e respetivas características.

Descrição das secções			
	Secção 1	Secção 2	Secção 3
			
Localização da secção	32°44'15.18"N 16°49'50.53"W	32°44'8.45"N 16°49'45.47"W	32°44'11.05"N 16°49'6.66"W
Altura da secção [m]	1.20	7.90	4.30
Largura da secção [m]	4.00	4.95	7.80
Declive [m/m]	0.075	0.054	0.001
Características	Canal de geometria retangular, com margens naturais e leito com rochas de grande volume.	Canal de geometria retangular, com margens naturais de terra e algumas zonas de pedra emparelhada, leito com rochas e alguma vegetação.	Canal de geometria retangular, com paredes de pedra emparelhada e leito com rochas e alguma vegetação.

	Secção 4	Secção 5	Secção 6
			
Localização da secção	32°44'5.37"N 16°48'22.02"W	32°44'9.12"N 16°48'0.71"W	32°44'14.79"N 16°47'53.24"W
Altura da secção [m]	2.55	7.00	3.40
Largura da secção [m]	14.20	11.00	4.50
Declive [m/m]	0.033	0.026	0.166
Características	Canal de geometria trapezoidal, com margens naturais, leito com rochas de grande volume e presença de vegetação quer no leito quer nas margens.	Canal de geometria retangular, com paredes em betão e leito com rochas e presença de vegetação.	Canal de geometria retangular, com paredes em betão, leito com rochas e presença de vegetação.

	Secção 7	Secção 8	Secção 9
			
Localização da secção	32°44'4.76"N 16°47'33.83"W	32°44'0.66"N 16°47'9.13"W	32°44'1.90"N 16°46'40.05"W
Altura da secção [m]	4.00	5.30	5.10
Largura da secção [m]	14.00	9.85	8.00
Declive [m/m]	0.027	0.014	0.054
Características	Canal de geometria retangular, com paredes em betão, leito com rochas e alguma vegetação.	Canal de geometria retangular, com a margem esquerda em betão e a margem direita de pedra emparelhada e leito com rochas e alguma vegetação.	Canal de geometria retangular, com paredes naturais de terras na margem direita e parede em betão na margem esquerda, leito com pedras roladas e presença de vegetação no leito e nas margens.

	Secção 10	Secção 11
		
Localização da secção	32°43'39.36"N 16°46'22.78"W	32°43'11.94"N 16°46'1.39"W
Altura da secção [m]	5.95	5.40
Largura da secção [m]	16.30	24.30
Declive [m/m]	0.035	0.034
Características	Canal de geometria retangular, com paredes em betão e leito com rochas e alguma vegetação.	Canal de geometria retangular, com paredes em betão e leito com rochas, acumulação de sedimentos e alguma vegetação.

Capítulo 4

ANÁLISE DO SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO DO LREC

Na sequência do evento de 20 de fevereiro de 2010 foi elaborado um estudo, denominado “Estudo de Avaliação do Risco de Aluviões”, pelo Instituto Superior Técnico (IST), pela Universidade da Madeira (UMa) e pelo LREC, requerido pela Secretaria Regional do Equipamento Social (SRES), cujo objetivo era avaliar e caracterizar os riscos associados às aluviões e estabelecer princípios orientadores de proteção, onde se incluía, entre outros princípios, a implementação de um sistema de previsão e aviso [54].

Foi com base neste estudo que o LREC desenvolveu um sistema de monitorização automático, semelhante àquele descrito no Capítulo 3, para as bacias hidrográficas das três ribeiras do Funchal (São João, Santa Luzia e João Gomes) e para a bacia hidrográfica da Ribeira Brava, afetadas pelo evento de 20 de fevereiro.

4.1. CARACTERÍSTICAS DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS EM ESTUDO

As bacias hidrográficas em estudo estão localizadas na costa sul da ilha (*vide* Figura 4.1) e são caracterizadas por um declive médio entre os 28 e os 37 %, havendo áreas com declives superiores a 50 %. A bacia da Ribeira Brava é a de maior dimensão, com uma área de, aproximadamente, 40.9 km², em contraste com a Ribeira de João Gomes, com, aproximadamente, 11.4 km² [54]. Na Tabela 4.1 estão identificadas algumas características das bacias, como a área, a altitude máxima e o declive médio, o comprimento do curso de água principal e o tempo de concentração.

Tabela 4.1 - Características gerais sobre as bacias em estudo, adaptado de [54].

Bacia hidrográfica	Área [km ²]	Altitude máxima [m]	Declive médio [%]	Comprimento do curso de água principal [km]	Tempo de concentração [h]
Ribeira de João Gomes	11.4	1595	28	10.22	1.60
Ribeira de Santa Luzia	15.6	1785	29	11.50	1.80
Ribeira de São João	14.7	1763	27	11.51	1.75
Ribeira Brava	40.9	1689	37	13.34	2.25

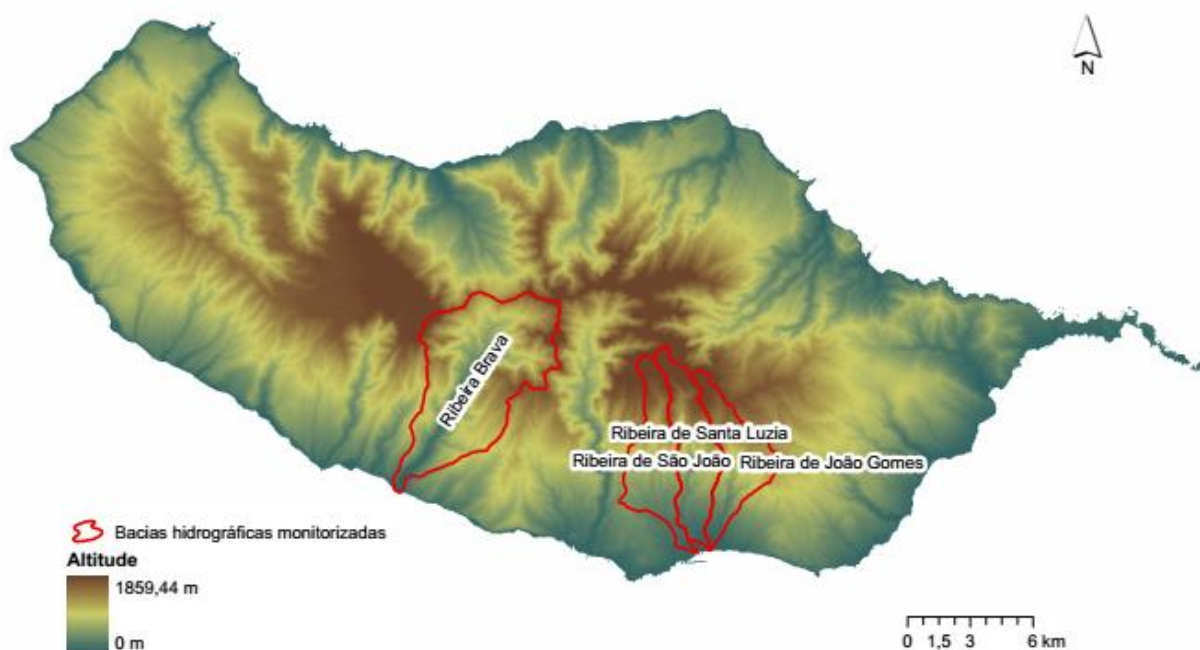


Figura 4.1 - Localização das bacias hidrográficas monitorizadas pelo LREC.

Relativamente à geologia, as zonas em estudo pertencem às unidades do Complexo Vulcânico Antigo, do Complexo Vulcânico Intermédio e do Complexo Vulcânico Superior, mais precisamente: as zonas de montante das bacias do Funchal e da Ribeira Brava estão incluídas nos Complexos Intermédios, com afloramentos do Complexo Antigo na Ribeira Brava; as zonas intermédias e de jusante do Funchal pertencem aos Complexos Intermédios e Superiores, assim com as da Ribeira Brava. Para além das formações de natureza vulcânica, existem ainda as formações sedimentares sob a forma de depósitos de vertente, depósitos aluvionares e depósitos de cobertura. Embora não estejam cartografados, existem, ainda, os depósitos de aterro, de origem antrópica [54].

Os tipos de solos predominantes na Ribeira Brava correspondem a Terreno Acidentado Êutrico, com cerca de 75.9 % de área ocupada, e *Umbric Andosols*, com 15.6 %. No Funchal, a maior parcela corresponde a *Umbric Andosols* (65.6 %), seguindo-se os *Chromic Cambosols* (15.1 %) e o Terreno Acidentado Dístrico (10.6 %) [54].

Quanto à forma das bacias hidrográficas das ribeiras do Funchal, estas apresentam uma configuração alongada. Na Ribeira Brava, a zona de cabeceira da bacia assume uma forma arredondada, tornando-se alongada na parte final. Quanto ao padrão de drenagem, as Ribeiras de São João, Santa Luzia e João Gomes exibem um padrão paralelo, enquanto a Ribeira Brava apresenta a montante um padrão de drenagem dendrítico, sendo a jusante dendrítico paralelo [54]. Os vales são encaixados, apresentando um perfil transversal em forma de “V”. Em qualquer uma das bacias em análise, a drenagem é do tipo exorreica, isto é, o escoamento é realizado continuamente até chegar ao mar.

4.2. SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS

O sistema de monitorização a implementar será distribuído ao longo do percurso principal das ribeiras em estudo. Será constituído por câmaras de vídeo, sensores de vibração do solo, nomeadamente sismómetros e geofones, udógrafos nas zonas de cabeira das bacias, sensores de nível ultrassónicos e de radar.

De modo a complementar a rede de udógrafos já existente, irão ser introduzidos um total de 12 udógrafos nas cabeceiras das bacias hidrográficas, onde 4 serão colocados na cabeceira da bacia da Ribeira Brava e os restantes 8 serão instalados nas cabeceiras das três ribeiras do Funchal. Foram seleccionados os udógrafos de báscula como equipamento de monitorização da precipitação, estes com uma báscula de 0.5 mm e uma superfície recetora de 400 cm². Caso o nível de precipitação registado durante um determinado tempo ultrapasse um limite previamente definido, irá ser enviado um alarme automático via GSM para a central de monitorização, localizada no LREC.

Nas estruturas de retenção de material sólido construídas nas ribeiras do Funchal será colocado um sensor de nível para monitorização do nível do escoamento, assim como um sismómetro para monitorização das vibrações induzidas por uma aluvião. Ião, também, ser definidos níveis limite de vibração do solo a partir do qual o sistema emite um alerta. Estes níveis só serão definidos *a posteriori*.

Ao longo do curso principal de água das ribeiras irão ser colocadas câmaras de vídeo vigilância, num total de 32 equipamentos. Ião ser utilizados dois tipos de câmaras: um tipo apenas para vigilância, colocado nas zonas de montante das bacias, e outro tipo, colocado ao longo dos

cursos principais, com o objetivo de analisar os canais quanto à ocorrência de uma aluvião através de um *firmware* de análise de imagem que deteta uma variação na cor do material em análise pela câmara.

Na Figura 4.2 é demonstrada a localização dos equipamentos do sistema de monitorização para a bacia hidrográfica da Ribeira Brava. Na cabeceira da bacia estão colocados os quatro udógrafos (identificados o símbolo de uma cruz verde), enquanto ao longo do curso principal da ribeira estão situadas as câmaras de vídeo vigilância, num total de 8 equipamentos.

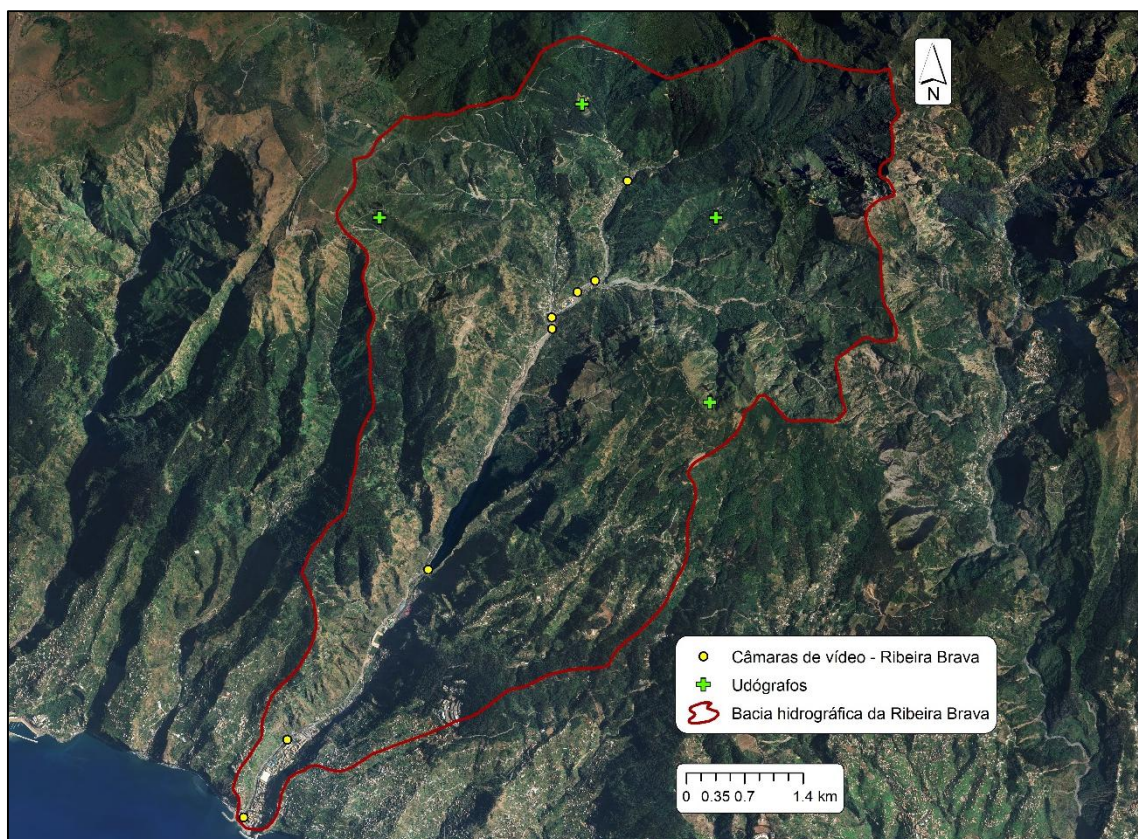


Figura 4.2 - Sistema de monitorização do LREC para a bacia hidrográfica da Ribeira Brava.

Na Figura 4.3 estão representados os locais das três principais ribeiras do Funchal a ser instrumentados. É possível observar os oito postos udográficos distribuídos pelas três bacias, assim como os pontos onde irão ser colocados os equipamentos de monitorização.

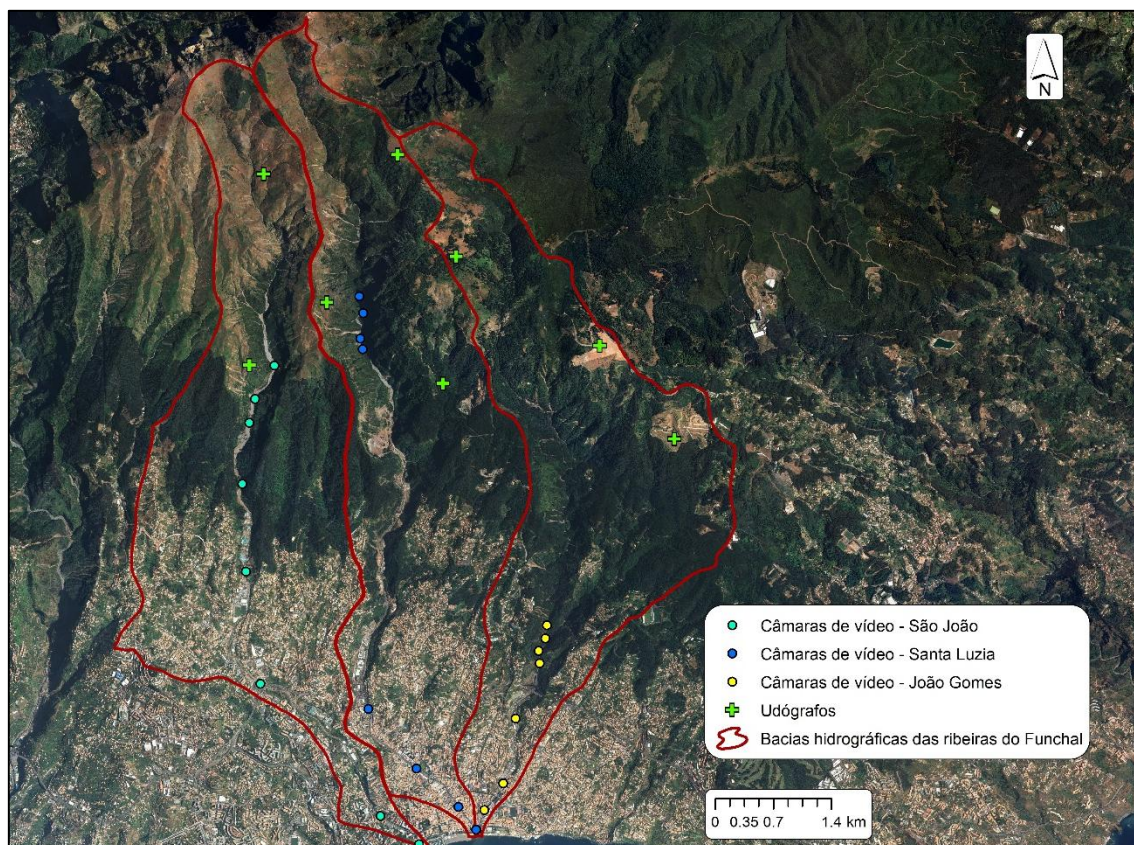


Figura 4.3 - Sistema de monitorização do LREC para as bacias hidrográficas das ribeiras do Funchal.

A transmissão das imagens das câmaras será realizada em tempo real por intermédio de antenas (*gateways*), via rádio frequência, colocadas em pontos estratégicos, de maneira a que o sinal seja enviado dos equipamentos para os *gateways* e posteriormente para o LREC. Foi optada pela utilização destes equipamentos como modo de transmissão dos dados, pois em zonas de vales encaixados não era possível o envio de outra forma.

Outro sistema de transmissão do sinal, em alternativa às antenas, será através da utilização da rede de fibra ótica. Este sistema será utilizado na Ribeira Brava e na Ribeira de João Gomes.

A Figura 4.4 ilustra o diagrama das ligações entre as câmaras de vídeo posicionadas ao longo do curso principal de cada ribeira, *gateways* e a estação de monitorização do LREC. Os pontos P1A a P8A, P1B a P8B, P1C a P8C e P1D a P8D correspondem, respetivamente, às ribeiras de João Gomes, Santa Luzia, São João e Ribeira Brava.

Futuramente, há o objetivo de expandir a rede de monitorização do LREC a outras bacias hidrográficas da região.

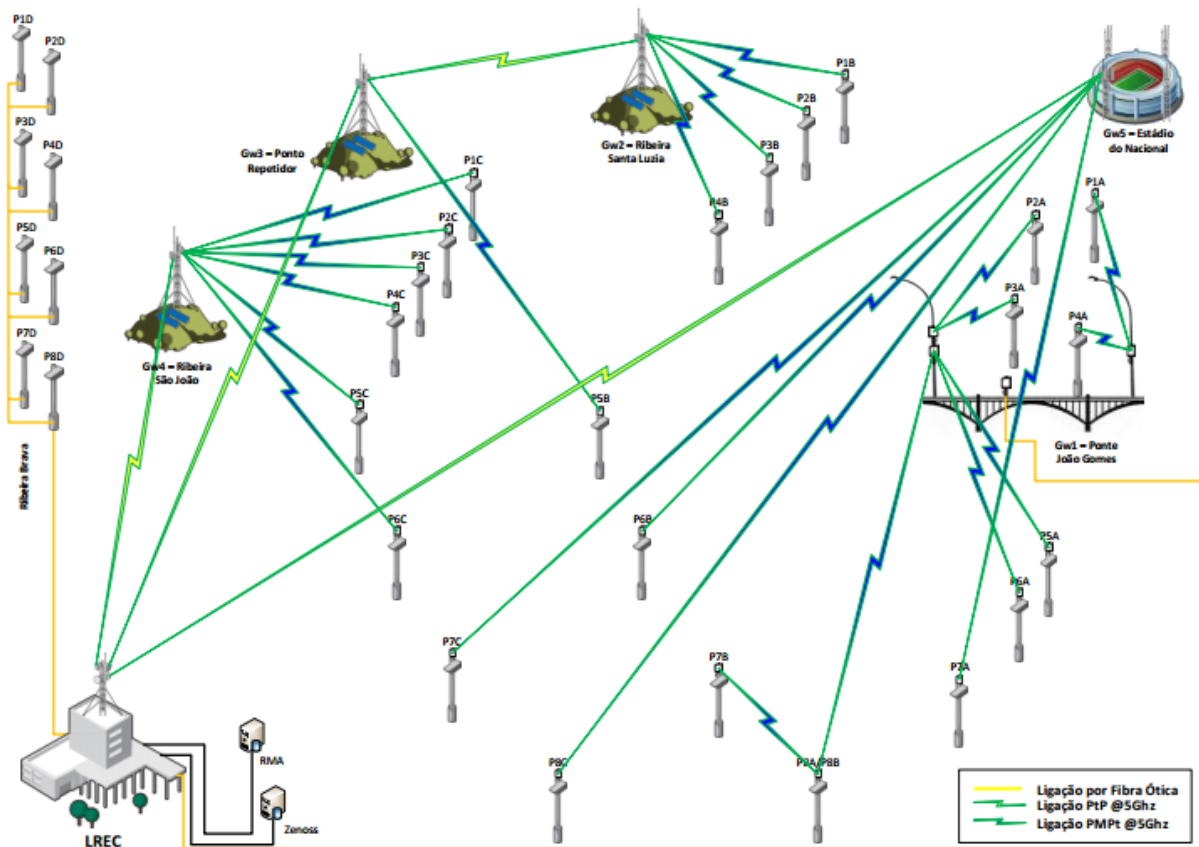


Figura 4.4 - Diagrama de ligações entre as câmeras de vídeo, gateways e LREC.

Capítulo 5

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1. PRINCIPAIS CONCLUSÕES

Os relevos acentuados, os vales com perfis transversais encaixados, a rápida convergência do escoamento superficial para os cursos de água, uma densidade de drenagem elevada e um tempo de concentração baixo são características que tornam a Ilha da Madeira numa região suscetível à ocorrência de aluviões de grande capacidade destrutiva.

De modo a combater os efeitos deste tipo de fenómeno poderão ser implementados sistemas de monitorização dos cursos de água, servindo estes como medida não estrutural na prevenção e mitigação das consequências. No capítulo 2 foram analisados vários equipamentos que poderiam ser incluídos num sistema de monitorização automático. No entanto, nem todos eles serão os mais adequados para implementar. Do ponto de vista da autora, os sensores de fio são os menos apropriados para a utilização, pois como são sensores de contacto, sempre que ocorre um fluxo de detritos é necessário a sua substituição. Já os geofones, sensores com tecnologia de radar e câmaras de vídeo vigilância são dos equipamentos mais fiáveis para a deteção e alerta de uma aluvião.

Para a implementação de um sistema de monitorização automático foi selecionada a bacia hidrográfica da Ribeira de Machico. Através da análise morfológica da bacia foi possível concluir que esta é menos suscetível à ocorrência de cheias. A sua forma alongada permite cursos de água mais extensos, o que favorece a infiltração. No entanto, face a eventos meteorológicos excecionais, como aquele em que ocorreu a aluvião de 20 de fevereiro de 2010, esta bacia, assim como qualquer outra bacia da região, transforma-se numa zona propensa à ocorrência de fluxos de detritos de maior ou menor gravidade. Um outro fator de grande importância ao analisar a suscetibilidade de ocorrência de aluviões numa bacia é o tempo de concentração e o respetivo tempo de resposta. À bacia da Ribeira de Machico correspondem tempos de concentração e de resposta de 2h 35min e 1h 33min, respetivamente. Face a estes valores é possível afirmar que bacia está mais sujeita ao

acontecimento de cheias de maior ponta, o que poderá inviabilizar a implementação de um sistema de monitorização.

Desenvolver um sistema de monitorização e alerta é um aspeto complexo não só devido aos fatores anteriormente mencionados, mas também devido ao carácter repentino dos fenómenos climáticos envolventes no processo de formação das aluviões, que colocam em causa a eficácia do sistema. A maior dificuldade sentida ao elaborar esta dissertação prendeu-se, de facto, com a idealização do sistema, ou seja, quais seriam os sensores a utilizar e os locais mais apropriados para os colocar.

Foi decidido que a monitorização da zona de montante da bacia seria realizada com recurso a udógrafos, colocados nas zonas de maior altitude, assim como sensores de humidade do solo, geofones, alguns sensores de nível com tecnologia de radar e câmaras de vídeo vigilância. Quanto à zona intermédia, esta seria monitorizada, maioritariamente, com recurso a sensores de nível com tecnologia de radar câmaras de vídeo vigilância colocadas em secções estratégicas.

Para a definição de um sistema de alerta poderão ser impostos um determinado nível de registo de dados por parte dos udógrafos, geofones ou sensores de nível. Porém, a definição destes níveis não é tão facilmente concretizável devido à inexistência de dados relativos às precipitações que originam aluviões ou às vibrações do solo induzidas por um fluxo de detritos.

A definição de níveis de vibração para os geofones não é uma tarefa simples já que estes são fortemente influenciados pela localização e pelo modo de montagem. A definição destes níveis pode ser realizada pelo método da amplitude ou pelo método dos impulsos, em que a melhor maneira para analisar os dados, segundo a literatura, será através da utilização simultânea de ambos os métodos. No entanto, a definição de níveis só deverá ser efetuada após se conhecerem dados quanto à frequência de vibração do solo.

Por fim, a implementação de um sistema de monitorização de ribeiras ou outros cursos de água para prevenção do risco de aluviões não é uma tarefa fácil pois não existe um sistema de monitorização absoluto. A implementação é um processo de investigação e de experimentação que requer uma calibração constante dos equipamentos e limites impostos, consoante o aprofundar dos conhecimentos.

5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em Portugal, a literatura e as investigações realizadas sobre as aluviões e os respetivos sistemas de monitorização e de alerta são escassas. Com esta dissertação pretendeu-se alargar os conhecimentos aos diversos sistemas e equipamentos, bem como compilar e introduzir em português material que pudesse de alguma forma servir de auxílio a futuros trabalhos nesta área. Assim, sugere-se para futuras investigações:

- Aprofundar os conhecimentos sobre os equipamentos de monitorização aplicados à temática das aluviões;
- Estudar outros sistemas de monitorização existentes;
- Analisar os dados resultantes dos equipamentos de monitorização e desenvolver modelos que proporcionem mais informações acerca do comportamento e dinâmica das aluviões na Ilha da Madeira;
- Estudar que níveis de alerta serão os mais apropriados para cada estação e para cada equipamento, quer sejam geofones, udógrafos ou outro qualquer equipamento que necessite de uma definição prévia de um limite;
- Aprofundar os conhecimentos geológicos e geotécnicos das bacias monitorizadas, assim como estudar a sua instrumentação através de sensores de medição do teor em água do solo.

REFERÊNCIAS

- [1] Abancó, C., Hürliman, M., Fritschi, B., Graf, C., & Moya, J. (2012). Transformation of Ground Vibration Signal for Debris-Flow Monitoring and Detection in Alarm Systems. *Sensors*, 12, 4870-4891. doi:10.3390/s120404870
- [2] Abancó, C., Hürlimann, M., & Moya, J. (2014). Analysis of the ground vibration generated by debris flows and other torrential processes at the Rebaixader monitoring site (Central Pyreness, Spain). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14, 929-943. doi:10.5194/nhess-14-929-2014
- [3] Arattano, M. (2000). On Debris Flow Front Evolution Along a Torrent. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 25(9), 733-740.
- [4] Arattano, M., & Grattoni, P. (2000). Using a fixed video camera to measure debris-flow surface velocity. In *Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment* (pp. 273-281). Balkema, Roterdão: Wieczorek & Naeser.
- [5] Arattano, M., & Marchi, L. (2000). Video-Derived Velocity Distribution Along a Debris Flow Surge. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B*(25(8)), 781-784.
- [6] Arattano, M., & Marchi, L. (2008). Systems and Sensors for Debris-flow Monitoring and Warning. *Sensors*, 8, 2436-2452.
- [7] Arattano, M., & Moia, F. (1999). Monitoring the propagation of a debris flow along a torrent. *Hydrological Sciences Journal*, 44(5), 811-823.
- [8] Arattano, M., Abancó, C., Coviello, V., & Hürlimann, M. (2014, agosto). Processing the ground vibration signal produced by debris flows: The methods of Amplitude and Impulses compared. *Computers & Geosciences*, 1-26. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2014.08.005
- [9] Arattano, M., Marchi, L., & Cavalli, M. (2012). Analysis of debris-flow recordings in an instrumented basin: confirmations and new findings. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12, 679-686. doi:10.5194/nhess-12-679-2012
- [10] Arattano, M., Marchi, L., & Deganutti, A. M. (2002). Data acquisition and processing in a small debris flow prone catchment. *ERB and Northern European FRIEND Project 5 Conference*. Slovakia.
- [11] Arattano, M., Marchi, L., Genevois, R., Berti, M., Simoni, A., Tecca, P., & Bonte, M. (1999). Field Monitoring and Real Time Management of Debris Flow. *European Project "Debris Flow Risk" (N. ENV4960253), Final Report*, 1.4.1-1.4.30.
- [12] Badoux, A., Graf, C., Rhyner, J., Kuntner, R., & McArdeil, B. W. (2009). A debris-flow alarm system for the Alpine Illgraben catchment: design and performance. *Natural Hazards*, 49(3), 517-539. doi:10.1007/s11069-008-9303-x

- [13] Berti, M., Genevois, R., LaHusen, R., Simoni, A., & Tecca, P. (2000). Debris flow monitoring in the Acquabona watershed on the Dolomites (Italian Alps). *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 25(9), 707-715.
- [14] Berti, M., Genevois, R., Simoni, A., & Tecca, P. R. (1999). Field observations of a debris flow event in the Dolomites. *Geomorphology*, 29(3), 265-274.
- [15] Bloemink, H. I., & Lanzinger, E. (2005). Precipitation type from the Thies disdrometer. *WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECO-2005)*. Bucharest, Romania.
- [16] Casella Measurement. (n.d.). *Tipping Bucket Rain Gauge*. Retrieved maio 12, 2014, from http://www.casellameasurement.com/downloads/datasheets/ds10_tipping_bucket.pdf
- [17] Consiglio Nazionale delle Ricerche - Istituto de Ricerca per la Protezione Idrogeologica. (n.d.). *Bacino Idrografico del Torrente Moscardo*. Retrieved abril 21, 2014, from http://www.irpi.to.cnr.it/index_en.php?page=moscardo_en
- [18] Costa, T. d., & Lança, R. (2011). *Sebenta de Hidráulica Aplicada do Instituto Superior de Engenharia da Universidade do Algarve*. Faro.
- [19] Dairybusiness. (n.d.). *Onset moisture sensor*. Retrieved maio 19, 2014, from <http://dairybusiness.com/archive/?p=9317>
- [20] Genevois, R., Berti, M., Ghirotti, M., Simoni, A., & Tecca, P. (1999). Debris Flow Monitoring and Analysis in the Dolomitic Region (upper Boite Valey, Italian Alps). *Thematic report, EC project, ENV4. CT96, 253, 2.21.1-2.21.58*.
- [21] GeoSIG Ltd. (n.d.). *Seismometers - VE-1X*. Retrieved maio 15, 2014, from <http://www.geosig.com/VE-1x-id10328.html>
- [22] Gianora, F., Somaini, D., Gardenghi, R., Badoux, A., & Graf, C. (2013). Debris-flow Alarm System for the Torrents Crenn and Dö in the Blenio Valley. *Annual Meeting of the Swiss Geomorphological Society*. St. Niklaus.
- [23] Graf, C., & McArdell, B. W. (2009). Debris-flow monitoring and debris-flow runout modelling before and after construction of mitigation measures: an example from an instable zone in the Southern Swiss Alps. In *La géomorphologie alpine: entre patrimoine et contrainte. Actes du colloque de la Société Suisse de Géomorphologie* (pp. 243-258).
- [24] Hall, M. (2011, julho 15). *Geophysical Stamps 3: Geophone*. Retrieved agosto 4, 2014, from <http://www.agilegeoscience.com/journal/2011/7/15/geophysical-stamps-3-geophone.html>
- [25] *How To Mount An Ultrasonic Sensor Above Open Water*. (2014, janeiro 8). Retrieved abril 16, 2014, from <http://www.apgsensors.com/about-us/blog/how-to-mount-an-ultrasonic-sensor-above-open-water>

-
- [26] Ikeya, H. (1989). Debris Flow and its Countermeasures in Japan. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, pp. 15-33.
- [27] Instituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica. (n.d.). *Rainfall Thresholds for the Initiation of Landslides*. Retrieved agosto 8, 2014, from <http://rainfallthresholds.irpi.cnr.it/>
- [28] Itakura, Y., Inaba, H., & Sawada, T. (2005). A Debris-flow Monitoring Devices and Methods Bibliography. *Natural Hazards and Earth System Science*, 5(6), 971-977.
- [29] Iverson, R. M. (1997). The Physics of Debris Flow. *Reviews of Geophysics*, 35(3), 246-296.
- [30] Kean, J. W., Staley, D. M., & Cannon, S. H. (2011). In situ measurements of post fire debris flows in southern California: Comparisons of the timing and magnitude of 24 debris-flow events with rainfall and soil moisture conditions. *Journal of Geophysical Research*, 116, 1-21. doi:10.1029/2011JF002005
- [31] Ko, H.-Y., Fang, Y.-M., & Chang, Y.-H. (2010). The New Thinking of Application on Debris Flow Monitoring. *Proc. Int. Symp. Pacific Rim*.
- [32] Kunnath, A., Ramesh, M., & Selvan, V. (2010). Signal Processing for Wireless Geophone Network to Detect Landslides. *International Conference on Computer Applications and Industrial Electronics*. Kuala Lumpur.
- [33] LaHusen, R. (2005). Debris-flow instrumentation. In *Debris-flow Hazards and Related Phenomena* (pp. 291-304). Springer.
- [34] Lee, C.-Y., & Yin, H.-Y. (2013). Debris Flow Disaster Management in Taiwan - Challenges from Historic Events. *2013 APEC Typhoon Symposium*. Taipé.
- [35] Lee, H.-C., Banerjee, A., Fang, Y.-M., Lee, B.-J., & King, C.-T. (2010). Design of a multifunctional wireless sensor for in-situ monitoring of debris flows. *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, 59 (11), 2958-2967.
- [36] Lusa. (2014, fevereiro 20). *Diário de Notícias da Madeira*. Retrieved fevereiro 24, 2014, from <http://www.dnoticias.pt/actualidade/madeira/432178-quatro-anos-depois-do-20-de-fevereiro-muitos-continuam-a-espera-de-casa-n>
- [37] Marchi, L. (2012). Debris-flow monitoring in Italy. *International Workshop - Monitoring Bedload and Debris Flows in Mountain Basins*. Bolzano - Bozen.
- [38] Marchi, L., Arattano, M., & Deganutti, A. M. (2002). Ten years of debris-flow monitoring in the Moscardo Torrent (Italian Alps). *Geomorphology*, 46, 1-17.
- [39] Matthias, J., & Hungr, O. (2005). Classification and terminology. In *Debris-flow Hazards and Related Phenomena* (pp. 47-61). Springer.
- [40] Oliveira, R. P. (2014, fevereiro 20). Apontamentos da Unidade Curricular de Hidrologia e Recursos Hídricos do Instituto Superior Técnico. Lisboa.

- [41] Onset. (n.d.). *Soil Moisture Smart Sensors (S-SMx-M005)*. Retrieved maio 19, 2014, from http://wpc.306e.edgecastcdn.net/80306E/onsetcomp_com/files/manual_pdfs/15081-D-MAN-S-SM.pdf
- [42] Orgaz, M., Teixeira, M., & Amorim, V. (1995). Instrumentação e Métodos de Observação. Departamento de Física da Universidade de Aveiro.
- [43] Porto Editora, Infopédia. (n.d.). *Ondas sísmicas*. Retrieved julho 29, 2014, from [http://www.infopedia.pt/\\$ondas-sismicas](http://www.infopedia.pt/$ondas-sismicas)
- [44] Prada, S. (2012). Apontamentos da Unidade Curricular de Hidrologia e Recursos Hídricos da Universidade da Madeira. Funchal.
- [45] Quintal, R. (1999). Aluviões da Madeira. Séculos XIX e XX. *Territorium*, 6, 31-48.
- [46] Quintal, R. (2012). Aluviões da Madeira - Ler o Passado, Compreender o Presente, Prevenir o Futuro. *XIX Jornadas Pedagógicas de Educação Ambiental*. Câmara de Lobos.
- [47] Quintela, A. C. (1996). *Hidrologia e Recursos Hídricos*. Lisboa: Instituto Superior Técnico.
- [48] Ricardo, R. P., Câmara, E. M., & Ferreira, M. A. (1992). Carta de Solos da Ilha da Madeira. Lisboa.
- [49] Rockwell Automation. (n.d.). *Ultrasonic sensing*. Retrieved março 28, 2014, from <http://www.ab.com/en/epub/catalogs/12772/6543185/12041221/12041229/Ultrasonic-Sensing.html>
- [50] Rodrigues, C. M., Moreira, M., & Guimarães, R. C. (n.d.). *Apontamentos para as aulas de Hidrologia, Universidade de Évora*. Retrieved abril 2014, 10, from http://dspace.uevora.pt/rdpc/bitstream/10174/4721/1/Apontamentos_hidrologia.pdf
- [51] Rodrigues, D. M. (2005). *Análise de risco de movimentos de vertente e ordenamento do território na Madeira: aplicação ao caso de Machico, Tese de Doutoramento*. Funchal.
- [52] Rosa, L. M. (2010, fevereiro 21). *O Cantinho do Mundo*. Retrieved fevereiro 26, 2014, from <http://cantinhodomundo.blogspot.pt/2010/02/sem-palavras.html>
- [53] Scotton, P., Genevois, R., Moro, F., Zorzi, L., Girardi, G., & Praticelli, N. (2011). The Debris-Flows Monitoring System of Acquabona Torrent (Cortina D'Ampezzo, Belluno, Italy). *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, 595-603. doi:10.4408/IJEGE.2011-03.B-065
- [54] Secretaria Regional do Equipamento Social - Região Autónoma da Madeira; Instituto Superior Técnico; Universidade da Madeira; Laboratório Regional de Engenharia Civil. (2010). *Estudo de Avaliação do Risco de Aluviões na Ilha da Madeira - Relatório Base*. Funchal.

-
- [55] Silva, J. L. (2010, março 8). *Madeira Gentes e Lugares*. Retrieved abril 3, 2014, from <http://madeira-gentes-lugares.blogspot.pt/2011/02/aluviao-de-20-de-fevereiro-de-2010.html>
- [56] Silva, P. F., & Menezes, C. A. (1965). *Elucidário Madeirense* (Vol. 1). Edição da Junta Geral do Distrito Autónomo do Funchal.
- [57] Silveira, A. B., Madeira, J., Ramalho, R., Fonseca, P., & Prada, S. (2010). Carta Geológica da Ilha da Madeira na escala 1:50.000, Folhas A e B. Funchal: Secretaria Regional do Ambiente e Recursos Naturais, Governo Regional da Madeira e Universidade da Madeira.
- [58] Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos. (n.d.). *Mediateca - Hidro-album*. Retrieved maio 15, 2014, from <http://snirh.pt/index.php?idMain=5&idItem=7&albumID=10007&albumNOME=Outras&Sbacia=&pagina=0>
- [59] Stevens Water Monitoring Systems. (n.d.). *IRU-5000 Series, Operator's Manual*. Retrieved abril 11, 2014, from http://www.stevenswater.com/catalog/products/water_level_sensors/manual/90841%20Ultrasonic%20iru-5000.pdf
- [60] Stevens Water Monitoring Systems. (n.d.). *Product Catalog & Resource Guide*. Retrieved abril 14, 2014, from http://www.stevenswater.com/resource_guide/files/assets/downloads/publication.pdf
- [61] Takuwa Corporation. (n.d.). *Wire Sensor for Debris Flow Detection*. Retrieved setembro 26, 2014, from <http://www.takuwa.co.jp/cms/img/eng/PDF/SABO/Wire%20sensor.pdf>
- [62] Tecca, P., Galgaro, A., Genevois, R., & Deganutti, A. (2003). Development of a remotely controlled debris flow monitoring system in the Dolomites (acquabona, Italy). *Hydrological Processes*, 17(9), 1771-1784. doi:10.1002/hyp.1212
- [63] Teixeira, H. M. (2010). Caracterização Hidráulica, Hidrológica e de Transporte Sólido do Evento de 20 de Fevereiro de 2010 na Ribeira de São João - Ilha da Madeira, Dissertação de Mestrado. Funchal.
- [64] U. S. Department of the Interior - Bureau of Reclamation. (n.d.). *AgriMet Precipitation Measurements*. Retrieved abril 11, 2014, from <http://www.usbr.gov/pn/agrimet/precip.html>
- [65] United States Geological Survey. (2011, dezembro 1). *Landslide Hazards Program*. Retrieved fevereiro 27, 2014, from <http://landslides.usgs.gov/monitoring/hwy50/rtd/geophone.php>
- [66] Upton, G., & Brawn, D. (2008). An investigation of factors affecting the accuracy of Thies disdrometers. *WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECO-2008)*. St. Petersburg, Russian Federation.
- [67] World Meteorological Organization. (2008). *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*. Geneva: Chairperson, Publications Board.

- [68] Yin, H.-Y., Huang, C.-J., Chen, C.-Y., Fang, Y.-M., Lee, B.-J., & Chou, T.-Y. (2011). The present development of debris flow monitoring technology in Taiwan - A case study presentation. *5th International Conference on Debris-Flow Hazards "Mitigation, Mechanics, Prediction and Assessment"*. Itália. doi:10.4408/IJEGE.2011-03.B-068
- [69] Zêzere, J. L., & Rodrigues, M. L. (2002). Rainfall thresholds for landsliding in Lisbon Area (Portugal). *Landslides*, 333-338.

ANEXOS

ANEXO I – DADOS PARA A CONSTRUÇÃO DA CURVA HIPSOMÉTRICA

Tabela A.1 – Dados para a construção da Curva Hipsométrica Adimensional.

Altitude [m]	Área [km²]	Área acima da cota [km²]	Área [%]	Área acumulada [%]
1077,6	0,00	0,00	0,00	0,00
1050	0,01	0,01	0,02	0,02
1000	0,05	0,06	0,22	0,24
950	0,08	0,14	0,34	0,58
900	0,10	0,24	0,42	0,99
850	0,15	0,39	0,63	1,63
800	0,22	0,61	0,90	2,52
750	0,30	0,91	1,24	3,77
700	0,72	1,63	2,99	6,76
650	1,55	3,18	6,44	13,20
600	1,66	4,84	6,88	20,08
550	2,10	6,94	8,69	28,77
500	2,08	9,02	8,61	37,38
450	2,10	11,12	8,71	46,09
400	1,73	12,84	7,15	53,24
350	1,70	14,54	7,03	60,27
300	1,65	16,18	6,82	67,09
250	1,69	17,87	6,99	74,08
200	1,67	19,54	6,91	80,99
150	1,40	20,93	5,78	86,78
100	1,39	22,32	5,77	92,54
50	1,10	23,43	4,57	97,11
0	0,70	24,12	2,89	100,00

ANEXO II – DADOS PARA A REALIZAÇÃO DO PERFIL LONGITUDINAL DO CURSO DE ÁGUA PRINCIPAL

Tabela A.2 - Dados para a construção do Perfil Longitudinal.

Cota [m]	Distância entre curvas [km]	Distância à foz [km]
1077,6	0,09	11,17
1050	0,11	11,08
1000	0,11	10,97
950	0,20	10,86
900	0,24	10,66
850	0,28	10,42
800	0,33	10,14
750	0,29	9,81
700	0,30	9,51
650	0,49	9,22
600	0,52	8,72
550	0,49	8,20
500	0,61	7,70
450	0,58	7,09
400	0,17	6,51
350	0,26	6,33
300	0,58	6,08
250	0,62	5,50
200	0,80	4,88
150	0,99	4,08
100	0,85	3,09
50	2,24	2,24
0	0,00	0,00

ANEXO III – PROPOSTA DE LOCALIZAÇÃO DAS SECÇÕES DE MONITORIZAÇÃO



Figura A.1- Proposta de localização das secções de monitorização.

